

# SUELO Y FERTILIDAD: BASES CIENTÍFICAS PARA EL MANEJO AGRONÓMICO

ISBN: 978-9942-571-23-6

## AUTORES:

ALFREDO LESVEL CASTRO LANDIN

RODRIGO PAUL CABRERA VERDEZOTO

ROCIO JAQUELINE CANOS ANDRADE

AUGUSTO RAFAEL FIENCO BACUSOY

MIGUEL ANGEL OSEJOS MERINO

JEAN CARLOS CHANCAY MERCHÁN

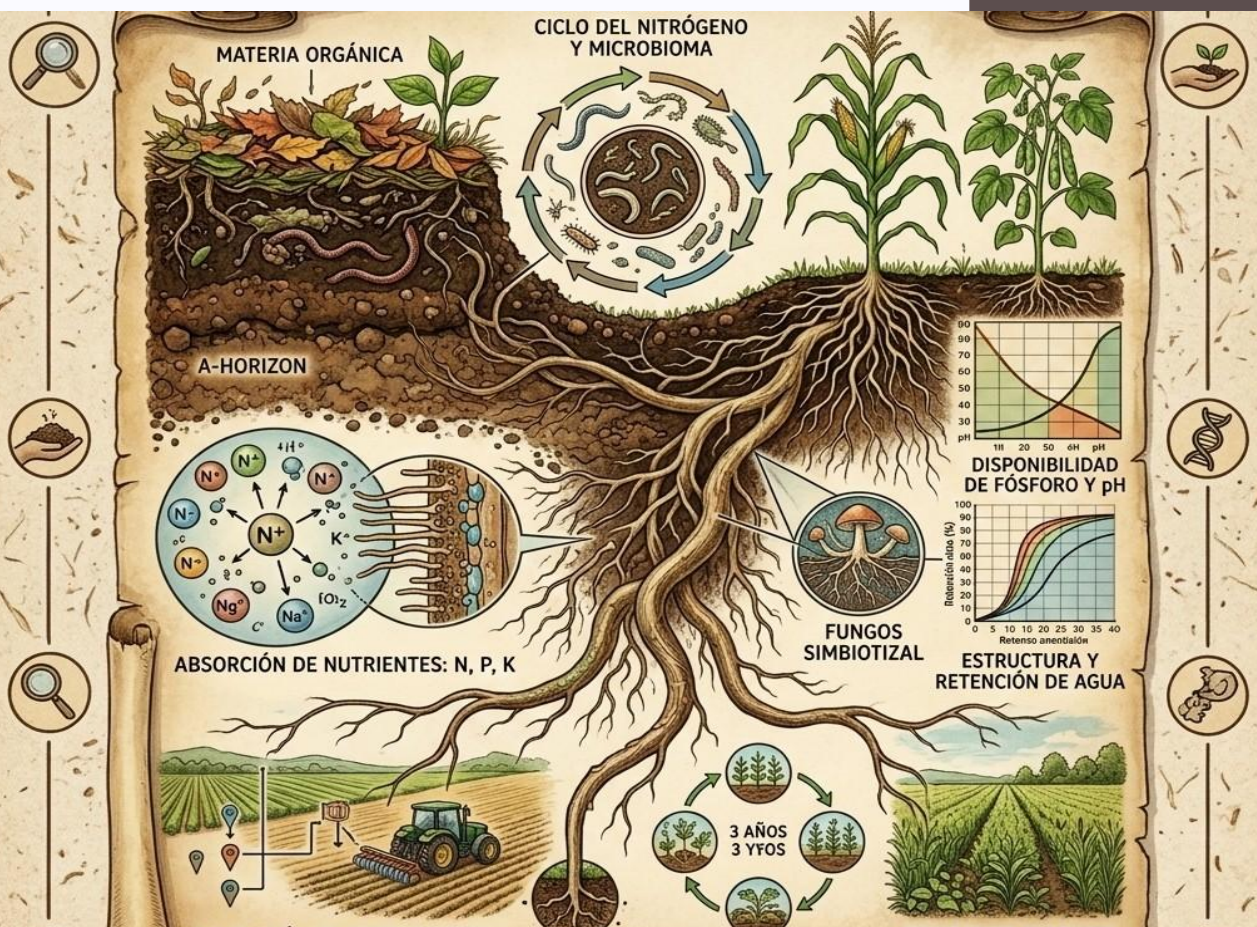
EDGAR MAURO CAICEDO ÁLVAREZ

EDGAR MAURICIO CAICEDO TAPIA

MONICA VIRGINIA TAPIA ZUÑIGA

LAURA CRISTINA MERCHAN NIETO

GABRIELA STEFANIA MORA PIN



# **SUELO Y FERTILIDAD: BASES CIENTÍFICAS PARA EL MANEJO AGRNOMICO**

**ALFREDO LESVEL CASTRO LANDIN  
RODRIGO PAUL CABRERA VERDEZOTO  
ROCIO JAQUELINE CANOS ANDRADE  
AUGUSTO RAFAEL FIENCO BACUSOY  
MIGUEL ANGEL OSEJOS MERINO  
JEAN CARLOS CHANCAY MERCHÁN  
EDGAR MAURO CAICEDO ÁLVAREZ  
EDGAR MAURICIO CAICEDO TAPIA  
MONICA VIRGINIA TAPIA ZUÑIGA  
LAURA CRISTINA MERCHAN NIETO  
GABRIELA STEFANIA MORA PIN**

**1. ALFREDO LESVEL CASTRO LANDIN**

Institucion:Universidad Estatal del Sur de Manabí: Autor del Capitulo I, PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA DETERMINACIÓN E INTERPRETACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE, DENSIDAD REAL Y POROSIDAD TOTAL DEL SUELO.

**2. RODRIGO PAUL CABRERA VERDEZOTO**

Institucion:Universidad Estatal del Sur de Manabí: Autor del Capitulo II, INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS FÍSICOS E HIDROFÍSICOS DEL SUELO.

**3. ROCIO JAQUELINE CANOS ANDRADE**

Institucion:Universidad Estatal del Sur de Manabí: Autor del Capitulo III, FACTORES Y PROCESOS DE FORMACIÓN DEL SUELO.

**4. AUGUSTO RAFAEL FIENCO BACUSOY**

Institucion:Universidad Estatal del Sur de Manabí: Autor del Capitulo IV, UTILIZACIÓN DE LOS MAPAS DE SUELOS Y LAS CLASIFICACIONES AGROPRODUCTIVA Y AGROLÓGICA PARA ESTABLECER LA RECOMENDACIÓN DE USO Y MANEJO EN LOS SUELOS DEL ECUADOR.

**5. MIGUEL ANGEL OSEJOS MERINO**

Institucion:Universidad Estatal del Sur de Manabí: Autor del Capitulo V, GÉNESIS Y CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS DEL ECUADOR.

**6. JEAN CARLOS CHANCAY MERCHÁN**

Institucion:Universidad Estatal del Sur de Manabí: Autor del Capitulo VI, MANEJO DE LA FERTILIZACIÓN QUÍMICA Y ORGÁNICA EN SISTEMAS PRODUCTIVOS.

**7. EDGAR MAURO CAICEDO ÁLVAREZ**

Institucion:Universidad Estatal del Sur de Manabí: Autor del Capitulo VII, MICROBIOLOGÍA DEL SUELO Y SU PAPEL EN LA NUTRICIÓN VEGETAL.

**8. EDGAR MAURICIO CAICEDO TAPIA**

Institucion:Universidad Estatal del Sur de Manabí: Autor del Capitulo VIII, MANEJO DIGITAL DEL SUELO Y AGRICULTURA DE PRECISIÓN.

**9. MONICA VIRGINIA TAPIA ZUÑIGA**

Institucion:Universidad Estatal del Sur de Manabí: Autor del Capitulo IX, PLANIFICACIÓN TERRITORIAL Y POLÍTICAS DE SUELOS PARA LA AGRICULTURA SOSTENIBLE.

**10. LAURA CRISTINA MERCHAN NIETO**

Institucion:Universidad Estatal del Sur de Manabí: Autor del Capitulo X, QUÍMICA DE SUELOS Y SU APLICACIÓN EN LA INGENIERÍA AMBIENTAL.

**11. GABRIELA STEFANIA MORA PIN**

Institucion:Universidad Estatal del Sur de MANABÍ: Autor del Capitulo X, REMEDIACIÓN QUÍMICA Y BIOGEOQUÍMICA DEL SUELO

# ÍNDICE

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| TITULO: OBSERVACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS                       |    |
| MORFOLÓGICAS DEL PERFIL. ....                                                  | 9  |
| 1. Introducción .....                                                          | 9  |
| 1.1 Definición de la morfología del suelo .....                                | 9  |
| 1.2 Importancia de la morfología en la pedología .....                         | 9  |
| 1.3 Relación entre morfología del suelo y su aptitud agrícola y ambiental..... | 10 |
| 2. Atributos Morfológicos del Suelo.....                                       | 10 |
| 2.1 Color .....                                                                | 10 |
| 2.2 Textura.....                                                               | 11 |
| 2.3 Estructura .....                                                           | 12 |
| 2.4 Consistencia.....                                                          | 12 |
| 2.5 Neoformaciones y Concreciones.....                                         | 13 |
| 2.6 Inclusiones .....                                                          | 13 |
| 2.7 Piedras y Gravas .....                                                     | 14 |
| 2.8 Desarrollo Radical.....                                                    | 14 |
| 2.9 Transición entre Horizontes .....                                          | 14 |
| 2.10 Presencia de Carbonatos.....                                              | 15 |
| 3. Estudio del Perfil del Suelo .....                                          | 15 |
| 3.1 Reconocimiento del Área .....                                              | 15 |
| 3.2 Apertura de la Calicata .....                                              | 15 |
| 3.3 Preparación del Perfil .....                                               | 16 |
| 3.4 Delimitación de Horizontes .....                                           | 17 |
| 3.5 Caracterización de Factores Formadores.....                                | 17 |
| 4. Interpretación de los Resultados Morfológicos .....                         | 18 |

|                                                                                                      |                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1                                                                                                  | Relación entre las características morfológicas y las limitaciones agroproductivas .....         | 18 |
| 4.2                                                                                                  | Cómo los análisis de campo y laboratorio se complementan para un diagnóstico efectivo.....       | 19 |
| 4.3                                                                                                  | Ejemplos de limitantes agroproductivas visibles: erosión, compactación, drenaje deficiente ..... | 20 |
| 5.                                                                                                   | Toma de Muestras del Suelo .....                                                                 | 21 |
| 5.1                                                                                                  | Fundamentos del Muestreo .....                                                                   | 21 |
| 5.2                                                                                                  | Principios Básicos del Muestreo .....                                                            | 21 |
| 5.3                                                                                                  | Control de Calidad en el Muestreo .....                                                          | 22 |
| 5.4                                                                                                  | Muestreo en Campos Experimentales .....                                                          | 23 |
| 5.5                                                                                                  | Preparación Previa del Estudiante .....                                                          | 23 |
| 6.                                                                                                   | Ejercicios Prácticos .....                                                                       | 24 |
| 6.1                                                                                                  | Ejercicio 1: Estudio de Perfil en Campo.....                                                     | 24 |
| 6.2                                                                                                  | Ejercicio 2: Análisis de los Resultados .....                                                    | 25 |
| 7.                                                                                                   | Conclusiones.....                                                                                | 26 |
| 7.1                                                                                                  | Resumen de la importancia del estudio morfológico en la edafología .....                         | 26 |
| TÍTULO: INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS ANALÍTICOS QUÍMICOS, FÍSICOQUÍMICOS Y BIOLÓGICOS DEL SUELO..... |                                                                                                  | 29 |
| 1.                                                                                                   | OBJETIVO .....                                                                                   | 29 |
| 1.1                                                                                                  | Objetivos del Capítulo .....                                                                     | 29 |
| 2.                                                                                                   | INTRODUCCIÓN .....                                                                               | 30 |
| 2.1                                                                                                  | Evaluación del pH (en agua, relación 1:2,5) .....                                                | 31 |
| 2.2                                                                                                  | Acidez Potencial o de Reserva.....                                                               | 31 |
| 2.3                                                                                                  | Contenido de materia orgánica (MO) .....                                                         | 33 |
| 2.4                                                                                                  | Capacidad de Intercambio Catiónico Total (Valor T).....                                          | 34 |
| 2.5                                                                                                  | Capacidad de cambio de bases (valor S) y saturación de bases (V)                                 | 35 |
| 2.6                                                                                                  | Contenido de Carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) .....                                             | 36 |
| 2.7                                                                                                  | Análisis Mineralógico de la Fracción Arcillosa.....                                              | 37 |

|                                                                                        |                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----|
| 2.8                                                                                    | Contenido de Sales Solubles Totales (SST) .....                  | 38 |
| 3.                                                                                     | PREPARACIÓN PREVIA DEL ESTUDIANTE .....                          | 40 |
| 3.1                                                                                    | EJERCICIOS DE LA CLASE .....                                     | 40 |
| Capítulo III: Rehabilitación de Suelos .....                                           |                                                                  | 41 |
| 1.                                                                                     | Objetivo .....                                                   | 41 |
| 2.                                                                                     | Requisitos Teóricos Fundamentales.....                           | 41 |
| 2.1                                                                                    | La acidez del suelo: conceptos clave .....                       | 41 |
| 2.2.                                                                                   | Causas principales de la acidez.....                             | 42 |
| 2.3                                                                                    | Estrategia de manejo en suelos ácidos .....                      | 42 |
| REHABILITACIÓN DE SUELOS CON PROBLEMAS DE ACIDEZ .....                                 |                                                                  | 43 |
| 1.                                                                                     | REQUISITOS TEÓRICOS FUNDAMENTALES.....                           | 43 |
| 1.1                                                                                    | La acidez del suelo: conceptos clave .....                       | 43 |
| 1.2                                                                                    | Causas principales de acidez (ejemplos regionales).....          | 43 |
| 1.3                                                                                    | Estrategia de manejo en suelos ácidos .....                      | 43 |
| 1.4                                                                                    | Efectos del encalado.....                                        | 44 |
| 1.5                                                                                    | Materiales encalantes y parámetros de calidad .....              | 44 |
| 1.6                                                                                    | Cálculo del encalado.....                                        | 45 |
| 2.                                                                                     | EJERCICIO RESUELTO .....                                         | 46 |
| 3.                                                                                     | EJERCICIOS PARA LA PREPARACIÓN PREVIA DEL ESTUDIANTE .....       | 46 |
| 3.1                                                                                    | EJERCICIOS PROPUESTOS .....                                      | 47 |
| Capítulo III: Rehabilitación de Suelos con Problemas de Salinidad y<br>Sódicidad ..... |                                                                  | 48 |
| 1.                                                                                     | Objetivo .....                                                   | 48 |
| 2.                                                                                     | Requisitos Teóricos Fundamentales.....                           | 48 |
| 2.1                                                                                    | Conceptos y métricas clave .....                                 | 48 |
| 2.2                                                                                    | Umbrales analíticos de referencia (clasificación operativa)..... | 49 |
| 2.3                                                                                    | Génesis y causas frecuentes.....                                 | 50 |
| 2.4                                                                                    | Estrategias de recuperación: visión integrada .....              | 50 |
| 3.                                                                                     | Métodos de Recuperación .....                                    | 50 |

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| A) Métodos físicos (soporte estructural).....                                                                                                | 50 |
| B) Métodos químicos (mejoradores/correctores).....                                                                                           | 50 |
| C) Métodos hidrotécnicos (indispensables) .....                                                                                              | 51 |
| D) Métodos biológicos (apoyo y pos-recuperación).....                                                                                        | 51 |
| 3.1 Cálculos Prácticos .....                                                                                                                 | 52 |
| 4. Ejercicios Propuestos.....                                                                                                                | 52 |
| 5. Metodología para determinar la cantidad de mejorador a aplicar en un suelo con problemas de sodicidad. ....                               | 53 |
| 5.1 ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE LOS MÉTODOS QUÍMICOS:                                                                                      | 54 |
| 6. Metodología a seguir en la recuperación de suelos salinos:.....                                                                           | 55 |
| 6.1 Recuperación de suelos salinos: .....                                                                                                    | 55 |
| 6.2 Recuperación de suelos salinos-sódicos: .....                                                                                            | 55 |
| 6.3 Recuperación de suelos sódicos: .....                                                                                                    | 55 |
| 7. PREPARACIÓN PREVIA DEL ESTUDIANTE: .....                                                                                                  | 56 |
| 7.1 EJERCICIOS PROPUESTOS: .....                                                                                                             | 56 |
| CAPÍTULO I: PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA DETERMINACIÓN E INTERPRETACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE, DENSIDAD REAL Y POROSIDAD TOTAL DEL SUELO ..... | 60 |
| 1. OBJETIVO .....                                                                                                                            | 60 |
| 2. INTRODUCCIÓN .....                                                                                                                        | 60 |
| 2.1 ORIENTACIONES DE LABORATORIO (fuente de apoyo) .....                                                                                     | 60 |
| 3. DESARROLLO .....                                                                                                                          | 61 |
| 3.1 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD REAL ( $D_r$ ) — MÉTODO DEL PICNÓMETRO.....                                                                 | 61 |
| 3.2 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE ( $d_a$ ) — MÉTODO DEL CILINDRO CORTANTE .....                                                     | 62 |
| 3.3 INTERPRETACIÓN TÉCNICA.....                                                                                                              | 63 |
| 3.4 Diagnóstico de compactación (criterios prácticos) .....                                                                                  | 64 |
| 4. Plantilla editable: Densidad Real ( $D_r$ ), Densidad Aparente ( $d_a$ ) y Porosidad Total ( $P_t$ ) .....                                | 67 |

|                                                                                                                |                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1                                                                                                            | Densidad Real (Dr) – Método del picnómetro .....                   | 67 |
| 4.2                                                                                                            | Densidad Aparente (da) – Cilindro cortante .....                   | 67 |
| 4.3                                                                                                            | Porosidad Total (Pt).....                                          | 68 |
| CAPÍTULO II: Interpretación de resultados físicos e hidrofísicos del suelo..                                   |                                                                    | 70 |
| 1.                                                                                                             | OBJETIVO: .....                                                    | 70 |
| 2.                                                                                                             | FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....                                          | 70 |
| 1.1                                                                                                            | Importancia de la evaluación físico–hidrofísica .....              | 70 |
| 3.                                                                                                             | INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....                                  | 70 |
| 3.1                                                                                                            | Evaluación de la textura .....                                     | 70 |
| 3.2                                                                                                            | Densidad aparente (da).....                                        | 71 |
| 3.3                                                                                                            | Densidad Real (Dr) y su Interpretación .....                       | 72 |
| 3.4                                                                                                            | Porosidad Total (Pt) y su Interpretación .....                     | 72 |
| 3.5                                                                                                            | Porosidad diferenciada.....                                        | 73 |
| 3.6                                                                                                            | Capacidad de campo (CC).....                                       | 74 |
| 3.7                                                                                                            | Coeficiente de marchitez (CM).....                                 | 74 |
| 3.8                                                                                                            | Humedad higroscópica (Hy) .....                                    | 75 |
| 3.9                                                                                                            | Índice de plasticidad (IP) .....                                   | 76 |
| 3.10                                                                                                           | Velocidad de infiltración (Vi) .....                               | 76 |
| 4.                                                                                                             | ACTIVIDADES Y EJERCICIOS .....                                     | 77 |
| RECOMENDACIONES DE USO Y MANEJO DE SUELOS CON LIMITANTES QUÍMICAS, FISCOQUÍMICAS, FÍSICAS E HIDROFÍSICAS ..... |                                                                    | 78 |
| 1.                                                                                                             | Objetivo .....                                                     | 78 |
| 2.                                                                                                             | Metodología de trabajo (secuencia operativa) .....                 | 78 |
| 2.1                                                                                                            | Inventario de evidencias (perfil y laboratorio).....               | 78 |
| 3.                                                                                                             | Criterios de priorización y decisión .....                         | 79 |
| 3.1                                                                                                            | Principios de orden de prioridad .....                             | 79 |
| 3.2                                                                                                            | Principios para definir el uso del suelo.....                      | 79 |
| 3.3                                                                                                            | Principios generales de mejoramiento.....                          | 79 |
| 4.                                                                                                             | Recomendaciones específicas por limitante (síntesis accionable)... | 79 |

|                                                                |                                                                                                                       |    |
|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1                                                            | Acidez ( <b><i>pH</i></b> < 5.5; <b><i>Y3</i></b> > 0) .....                                                          | 79 |
| 4.2.                                                           | Baja fertilidad (T baja; S/T bajo; MO baja) .....                                                                     | 80 |
| 4.3                                                            | Salinidad ( $EC_e > 4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ ) .....                                                         | 80 |
| 4.4                                                            | Sodicidad ( $ESP \geq 15$ o $SAR \geq 13$ ; pH 8.5–10) .....                                                          | 80 |
| 4.5                                                            | Suelos calcáreos ( <b><i>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></i></b> <b><i>activo</i></b> ; <b><i>pH</i></b> 7.5 – 8.4) ..... | 80 |
| 4.6                                                            | Drenaje deficiente / Aireación deficiente .....                                                                       | 80 |
| 4.7                                                            | Compactación ( $da \uparrow$ , $Pt \downarrow$ , $Vi \downarrow$ ) .....                                              | 81 |
| 4.8                                                            | Baja retención hídrica (CC baja; arenas) .....                                                                        | 81 |
| 4.9                                                            | Elevada plasticidad ( $IP > 45$ ).....                                                                                | 81 |
| 4.10                                                           | Profundidad efectiva limitada .....                                                                                   | 81 |
| 4.11                                                           | Erosión hídrica y relieve .....                                                                                       | 81 |
| 4.12                                                           | Pedregosidad/Rocosidad.....                                                                                           | 82 |
| 5.                                                             | Cálculos clave para decisiones .....                                                                                  | 82 |
| 5.1                                                            | Fertilidad: S y V.....                                                                                                | 82 |
| 5.2                                                            | Encalado (acidez tóxica) .....                                                                                        | 82 |
| 5.3                                                            | Sodicidad (requerimiento de yeso, GR).....                                                                            | 82 |
| 5.4                                                            | Guía para selección de enmienda (caso práctico solicitado) ...                                                        | 82 |
| 5.5                                                            | TALLER INTEGRADOR DEL TEMA .....                                                                                      | 84 |
| DIAGNÓSTICO DE PROCESOS EROSIVOS EN CAMPO Y VÍAS DE CONTROL .. |                                                                                                                       | 88 |
| I.                                                             | Objetivos .....                                                                                                       | 88 |
| II.                                                            | Preparación previa del estudiante .....                                                                               | 88 |
| III.                                                           | Fundamentos operativos para el diagnóstico .....                                                                      | 88 |
| 3.1                                                            | Tipos y formas de erosión (reconocimiento rápido) .....                                                               | 88 |
| 3.2                                                            | Factores de control (marco RUSLE para erosión hídrica).....                                                           | 88 |
| 3.3                                                            | Indicadores morfológicos y funcionales (lista de verificación) .....                                                  | 89 |
| IV.                                                            | Herramientas de evaluación y decisión .....                                                                           | 90 |
| 4.1                                                            | Escala de severidad (campo) .....                                                                                     | 90 |
| 4.2                                                            | Matriz de priorización (ejemplo de puntuación 1–5).....                                                               | 91 |
| V.                                                             | Medidas de manejo y control (portafolio orientativo) .....                                                            | 91 |

|                                                                                                                                                                                    |                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1                                                                                                                                                                                | Agronómicas/biológicas .....                                       | 91  |
| 5.2                                                                                                                                                                                | Mecánicas/hidrotécnicas .....                                      | 91  |
| VI.                                                                                                                                                                                | Formatos de campo (listos para copiar/pegar en su documento).....  | 92  |
| VII.                                                                                                                                                                               | Mini-ejemplo aplicado (cálculo rápido con RUSLE).....              | 92  |
| VIII.                                                                                                                                                                              | Entregables del taller (equipo).....                               | 93  |
| IX.                                                                                                                                                                                | Criterios de evaluación.....                                       | 93  |
| CAPITULO III: FACTORES Y PROCESOS DE FORMACIÓN DEL SUELO .....                                                                                                                     |                                                                    | 95  |
| I.                                                                                                                                                                                 | Objetivo .....                                                     | 95  |
| II.                                                                                                                                                                                | Fundamentos Teóricos .....                                         | 95  |
| 2.1                                                                                                                                                                                | Factores formadores del suelo.....                                 | 95  |
| 2.2                                                                                                                                                                                | Procesos elementales de formación .....                            | 96  |
| 2.3.                                                                                                                                                                               | Caracterización morfológica del perfil .....                       | 96  |
| III.                                                                                                                                                                               | Interpretación del perfil .....                                    | 97  |
| IV.                                                                                                                                                                                | Clasificación del suelo .....                                      | 98  |
| 4.1                                                                                                                                                                                | Según la Tercera Versión (1980).....                               | 98  |
| 4.2                                                                                                                                                                                | Según la Nueva Versión (1995) .....                                | 98  |
| V.                                                                                                                                                                                 | Limitantes agroproductivas detectadas .....                        | 98  |
| VI.                                                                                                                                                                                | Recomendaciones técnicas de manejo .....                           | 99  |
| VII.                                                                                                                                                                               | Guía de análisis para los ejercicios de la clase .....             | 100 |
| CAPÍTULO IV: Utilización de los mapas de suelos y las clasificaciones agroproductiva y agrológica para establecer la recomendación de uso y manejo en los suelos del Ecuador ..... |                                                                    | 101 |
| 1.                                                                                                                                                                                 | Introducción .....                                                 | 101 |
| 2.                                                                                                                                                                                 | Fundamentos teóricos de la cartografía de suelos en Ecuador .....  | 101 |
| 3.                                                                                                                                                                                 | Clasificación agroproductiva en el contexto ecuatoriano.....       | 102 |
| 4.                                                                                                                                                                                 | Clasificación agrológica y su aplicación en el uso del suelo ..... | 103 |
| 5.                                                                                                                                                                                 | Metodología de interpretación de los mapas de suelos .....         | 104 |
| 6.                                                                                                                                                                                 | Ejemplo aplicado: Zona costera de Manabí .....                     | 105 |
| 7.                                                                                                                                                                                 | Recomendaciones generales de manejo sostenible .....               | 105 |
| 8.                                                                                                                                                                                 | Conclusiones.....                                                  | 106 |

|                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| CAPITULO V: GÉNESIS Y CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS DEL ECUADOR...                            | 107 |
| 1. OBJETIVO DEL CAPÍTULO:.....                                                              | 107 |
| 2. Descripción, caracterización y clasificación de los suelos en condiciones de campo ..... | 107 |
| 2.1 Introducción .....                                                                      | 107 |
| 3. Fundamentos teóricos de la descripción de suelos .....                                   | 107 |
| 4. Factores formadores de los suelos del Ecuador.....                                       | 109 |
| 3. Metodología de descripción y muestreo de perfiles.....                                   | 109 |
| 3.1 Selección del sitio .....                                                               | 109 |
| 3.2 Excavación del perfil.....                                                              | 110 |
| 3.3 Descripción morfológica.....                                                            | 110 |
| 3.4 Muestreo y análisis.....                                                                | 110 |
| 4. Clasificación de los suelos en el Ecuador .....                                          | 110 |
| 4.1 Tipos genéticos predominantes .....                                                     | 110 |
| 4.2 Clasificación agrológica .....                                                          | 111 |
| 5. Ejemplo aplicado: Perfil típico de un suelo Andino (Andisol) .....                       | 111 |
| 6. Recomendaciones generales para la caracterización de campo....                           | 113 |
| 7. Conclusiones.....                                                                        | 113 |
| Taller integrador del Tema II .....                                                         | 113 |
| I. OBJETIVO GENERAL.....                                                                    | 113 |
| II. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                                                              | 113 |
| III. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....                                                              | 114 |
| IV. MATERIALES Y EQUIPO NECESARIO .....                                                     | 114 |
| V. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....                                                              | 115 |
| VI. EJERCICIOS A DESARROLLAR .....                                                          | 115 |
| VII. EJEMPLO APLICADO (CASO DE CAMPO) .....                                                 | 117 |
| VIII. CONCLUSIONES .....                                                                    | 118 |
| Valoración de formas predominantes, pérdidas, carencias y excesos .....                     | 118 |
| 1. Marco Teórico: Elementos Esenciales.....                                                 | 118 |

|                                                                                                                                         |                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----|
| 1.1                                                                                                                                     | Concepto de elemento esencial y categorías.....                   | 118 |
| 1.2                                                                                                                                     | Disponibilidad en el suelo: formas químicas y dinámicas .....     | 119 |
| 1.3                                                                                                                                     | Pérdidas, carencias y excesos.....                                | 119 |
| 1.4                                                                                                                                     | Principales elementos y sus particularidades en el suelo agrícola | 120 |
| 1.5                                                                                                                                     | Interpretación y toma de decisiones en suelos agrícolas .....     | 120 |
| 1.6                                                                                                                                     | Conclusión del marco teórico.....                                 | 121 |
| 2.                                                                                                                                      | Ejercicios a Resolver en Clase.....                               | 121 |
| 3.                                                                                                                                      | Conclusión del Taller .....                                       | 126 |
| CAPÍTULO VI: MANEJO DE LA FERTILIZACIÓN QUÍMICA Y ORGÁNICA EN SISTEMAS PRODUCTIVOS .....                                                |                                                                   | 127 |
| 1.                                                                                                                                      | Objetivos .....                                                   | 127 |
| 2.                                                                                                                                      | Fundamentación teórica .....                                      | 127 |
| 2.1                                                                                                                                     | Principales variantes de cálculo .....                            | 128 |
| 2.2                                                                                                                                     | Ejercicios resueltos.....                                         | 128 |
| 3.                                                                                                                                      | Ejercicios propuestos.....                                        | 130 |
| Cálculo de dosis y cantidad de fertilizantes a partir de la selección de la fórmula más adecuada, aplicando el ajuste de fórmulas ..... |                                                                   | 131 |
| 1.                                                                                                                                      | Objetivos .....                                                   | 131 |
| 2.                                                                                                                                      | Criterios de selección (reglas operativas) .....                  | 131 |
| 2.1                                                                                                                                     | Si toda la fertilización es de fondo .....                        | 131 |
| 2.2                                                                                                                                     | Si hay fertilización fraccionada (fondo + cobertura) .....        | 132 |
| 3.                                                                                                                                      | Procedimiento general (algoritmo breve).....                      | 132 |
| 4.                                                                                                                                      | Ejemplos resueltos .....                                          | 132 |
| 5.                                                                                                                                      | Plantillas listas para copiar (cuadros de trabajo) .....          | 134 |
| 5.1                                                                                                                                     | Hoja rápida de selección por ri.....                              | 134 |
| 5.2                                                                                                                                     | Hoja de cálculo de dosis y aportes .....                          | 135 |
| 6.                                                                                                                                      | Notas técnicas útiles (operativas) .....                          | 135 |
| 7.                                                                                                                                      | Ejercicios propuestos.....                                        | 135 |

Integración del cálculo y aplicación de fertilizantes químicos para la rehabilitación de suelos y la sostenibilidad agroambiental en el Ecuador 136

|                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. Introducción .....                                             | 136 |
| 2. Objetivos .....                                                | 136 |
| 2.1 Objetivo general: .....                                       | 136 |
| 2.2 Objetivos específicos: .....                                  | 137 |
| 3. Desarrollo teórico-práctico .....                              | 137 |
| 3.1 Fundamentos técnicos de la fertilización en suelos degradados | 137 |
| 3.2 Selección y ajuste de fórmulas .....                          | 137 |
| 3.3 Cálculo de dosis de fertilizantes .....                       | 138 |
| 3.4 Aplicación sostenible de fertilizantes .....                  | 138 |
| 4. Ejercicio resuelto .....                                       | 138 |
| 5. Ejercicios propuestos .....                                    | 139 |
| 6. Conclusiones y recomendaciones .....                           | 140 |

Taller integrador de manejo sostenible del suelo e implementación de sistemas integrados de nutrición vegetal (SINV) .....

|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| 1. Introducción .....                      | 140 |
| 2. Objetivo general .....                  | 141 |
| 3. Preparación previa del estudiante ..... | 141 |
| 4. Metodología de trabajo .....            | 141 |
| 5. Sistemas propuestos .....               | 142 |
| 6. Actividades prácticas del taller .....  | 144 |
| 7. Evaluación .....                        | 144 |
| 8. Conclusión .....                        | 145 |

Capítulo X: Evaluación de la Calidad del Suelo en Condiciones de Campo 145

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 1. Introducción .....                 | 145 |
| 2. Objetivos .....                    | 145 |
| 3. Fundamentos teóricos .....         | 146 |
| 4. Metodología general de campo ..... | 146 |

|                                                                                         |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5. Ejercicio de campo .....                                                             | 147        |
| 6. Interpretación de resultados.....                                                    | 151        |
| 7. Conclusión .....                                                                     | 151        |
| <b>CAPITULO VII: “MICROBIOLOGÍA DEL SUELO Y SU PAPEL EN LA NUTRICIÓN VEGETAL” .....</b> | <b>153</b> |
| 1. Objetivos del capítulo:.....                                                         | 153        |
| 2. Introducción .....                                                                   | 153        |
| 3. Conceptos generales y diversidad microbiana.....                                     | 155        |
| 3.1 Conceptos básicos de microbiología del suelo.....                                   | 156        |
| 3.2 Factores que determinan la actividad microbiana.....                                | 156        |
| 3.3 Distribución espacial y vertical de los microorganismos.....                        | 157        |
| 3.4 Principales grupos de microorganismos del suelo .....                               | 158        |
| 3.5 Hábitats edáficos y clasificación funcional.....                                    | 159        |
| 3.6 Importancia ecológica y agronómica de la diversidad microbiana                      | 161        |
| 4. FUNCIONES ECOLÓGICAS Y BIOQUÍMICAS DE LOS MICROORGANISMOS DEL SUELO.....             | 161        |
| 4.1 Introducción general .....                                                          | 161        |
| 4.2 Ciclo del nitrógeno (N).....                                                        | 162        |
| 4.3 Ciclo del fósforo (P) .....                                                         | 163        |
| 4.4 Ciclo del azufre (S) .....                                                          | 164        |
| 4.5 Ciclo del carbono (C).....                                                          | 165        |
| 4.6 Integración ecológica de los ciclos biogeoquímicos.....                             | 166        |
| 5. Conclusiones.....                                                                    | 167        |
| <b>INTERACCIONES SUELO–PLANTA MICROORGANISMO .....</b>                                  | <b>167</b> |
| 1. Introducción .....                                                                   | 167        |
| 1.1 La rizósfera: un ecosistema dinámico .....                                          | 167        |
| 1.2 Micorrizas: simbiosis funcional entre hongos y raíces.....                          | 168        |
| 1.3 Bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) .....                           | 169        |
| 1.4 Biofilm radicular y comunicación microbiana .....                                   | 171        |

|                                                                            |                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----|
| 1.5                                                                        | Interacciones tripartitas: planta–hongo–bacteria.....                | 171 |
| 1.6                                                                        | Relevancia ecológica y productiva .....                              | 172 |
| 2.                                                                         | Conclusiones.....                                                    | 172 |
| MICROORGANISMOS BENEFICIOSOS Y SU IMPACTO EN LA ESTRUCTURA DEL SUELO ..... |                                                                      | 172 |
| 1.                                                                         | Introducción .....                                                   | 172 |
| 1.1                                                                        | Mecanismos microbianos de agregación del suelo.....                  | 173 |
| 1.2                                                                        | Microorganismos estructurantes clave.....                            | 174 |
| 1.3                                                                        | Relación entre microbiología y estabilidad estructural.....          | 175 |
| 1.4                                                                        | Sinergias entre microorganismos estructurantes .....                 | 176 |
| 1.5                                                                        | Aplicaciones prácticas y manejo biológico de la estructura del suelo | 176 |
| 1.6                                                                        | Indicadores biológicos de la calidad estructural .....               | 177 |
| 2.                                                                         | Conclusión .....                                                     | 181 |
| 3.                                                                         | Relevancia ecológica y sostenibilidad .....                          | 181 |
| 3.1                                                                        | Relevancia ecológica y sostenibilidad .....                          | 181 |
| 4.                                                                         | Conclusión del epígrafe .....                                        | 185 |
| Indicadores biológicos de calidad del suelo.....                           |                                                                      | 186 |
| 1.                                                                         | Principales indicadores biológicos.....                              | 186 |
| 1.1                                                                        | Aplicaciones prácticas .....                                         | 187 |
| 2.                                                                         | Manejo biológico de la fertilidad .....                              | 188 |
| 2.1                                                                        | Uso de inoculantes y biofertilizantes .....                          | 188 |
| 2.2                                                                        | Compost microbiano y bioactivadores.....                             | 188 |
| 2.3                                                                        | Integración con fertilización química .....                          | 189 |
| 2.4                                                                        | Agricultura regenerativa y biointensiva .....                        | 189 |
| 3.                                                                         | Estudio de caso: inoculación micorrízica en cultivos tropicales..... | 190 |
| 3.1                                                                        | Contexto y justificación .....                                       | 190 |
| 3.2                                                                        | Diseño experimental .....                                            | 190 |
| 3.3                                                                        | Resultados principales.....                                          | 190 |
| 3.4                                                                        | Implicaciones agronómicas y ecológicas .....                         | 191 |

|                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4. Conclusiones.....                                                                       | 191 |
| CAPÍTULO VIII: MANEJO DIGITAL DEL SUELO Y AGRICULTURA DE PRECISIÓN                         |     |
| .....                                                                                      | 192 |
| 1. Introducción a la agricultura digital .....                                             | 192 |
| 1.1 De la agricultura tradicional a la Agricultura 4.0.....                                | 192 |
| 1.2 Conceptos fundamentales: Smart Farming, IoT y automatización                           | 193 |
| 1.3 Beneficios agronómicos, económicos y ambientales.....                                  | 193 |
| 1.4 Grado de adopción tecnológica en América Latina y el Ecuador                           | 194 |
| 2. Sistemas de Información Geográfica (SIG) aplicados al suelo.....                        | 195 |
| 2.1 Georreferenciación de unidades edáficas.....                                           | 195 |
| 2.2 Mapeo de fertilidad, texturas y propiedades fisicoquímicas .                           | 196 |
| 2.3 Uso de índices espectrales (NDVI, NDRE) y modelos digitales del terreno (MDT).....     | 197 |
| 2.4 Plataformas y herramientas SIG más utilizadas .....                                    | 198 |
| 2.5 Aplicaciones en Ecuador y proyección futura .....                                      | 198 |
| 3. Modelos predictivos y Big Data agrícola .....                                           | 199 |
| 3.1 Inteligencia artificial para predicción de rendimiento y diagnóstico nutricional ..... | 199 |
| 3.2 Principales métodos de modelado predictivo.....                                        | 200 |
| 3.3 Fuentes y bases de datos agroclimáticas, edáficas y satelitales                        | 201 |
| 3.4 Modelos de fertilidad y balance de nutrientes basados en aprendizaje automático.....   | 202 |
| 3.5 Desafíos y perspectivas del Big Data agrícola .....                                    | 203 |
| 4. Fertilirriego inteligente y automatizado .....                                          | 203 |
| 4.1 Integración del suelo, el agua y los nutrientes en un sistema de control digital.....  | 204 |
| 4.2 Internet de las Cosas (IoT) y controladores automáticos para fertilirrigación .....    | 204 |

|                                                                                                   |                                                                              |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3                                                                                               | Sensores de humedad y salinidad conectados a redes inalámbricas.....         | 205 |
| 4.4                                                                                               | Plataformas comerciales y experiencias locales .....                         | 206 |
| 4.5                                                                                               | Beneficios y desafíos del fertirriego digital .....                          | 207 |
| 4.6                                                                                               | Perspectivas futuras .....                                                   | 207 |
| 5.                                                                                                | Indicadores digitales de sostenibilidad .....                                | 208 |
| 5.1                                                                                               | Huella de carbono y huella hídrica del sistema agrícola .....                | 208 |
| 5.2                                                                                               | Eficiencia de uso del nitrógeno (NUE) y del fósforo (PUE) .....              | 209 |
| 5.3                                                                                               | Monitoreo del balance energético y emisiones mediante IA .....               | 210 |
| 5.4                                                                                               | Toma de decisiones para la mitigación de impactos ambientales .....          | 210 |
| 5.5                                                                                               | Perspectivas futuras .....                                                   | 211 |
| 6.                                                                                                | Experiencias latinoamericanas .....                                          | 211 |
| 6.1                                                                                               | Ecuador: monitoreo de fertilidad en banano y cacao con drones .....          | 212 |
| 6.2                                                                                               | Brasil: inteligencia artificial aplicada a la soya y la caña de azúcar ..... | 212 |
| 6.3                                                                                               | México: agricultura de precisión en maíz con SIG y modelos predictivos ..... | 213 |
| 6.4                                                                                               | Lecciones aprendidas y retos socioeconómicos.....                            | 213 |
| 7.                                                                                                | Conclusiones y desafíos futuros.....                                         | 214 |
| CAPÍTULO IX: PLANIFICACIÓN TERRITORIAL Y POLÍTICAS DE SUELOS PARA LA AGRICULTURA SOSTENIBLE ..... |                                                                              | 216 |
| 1.                                                                                                | Importancia del suelo como recurso estratégico.....                          | 216 |
| 2.                                                                                                | Marco normativo internacional y nacional .....                               | 217 |
| 2.1                                                                                               | Marco internacional .....                                                    | 217 |
| 2.2                                                                                               | Marco normativo nacional ecuatoriano.....                                    | 219 |
| 2.3                                                                                               | Convergencia entre marcos internacionales y nacionales .....                 | 220 |
| 3.                                                                                                | Ordenamiento territorial y uso del suelo .....                               | 220 |
| 3.1                                                                                               | Zonificación agroecológica y capacidad de uso del suelo .....                | 220 |
| 3.2                                                                                               | Planificación rural y conflictos de uso .....                                | 222 |

|     |                                                                                   |     |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3 | Enfoque ecuatoriano de planificación integrada .....                              | 223 |
| 3.4 | Incentivos y mecanismos económicos .....                                          | 224 |
|     | Certificaciones ambientales y de carbono .....                                    | 225 |
| 3.5 | Educación, innovación y extensión agrícola .....                                  | 226 |
| 4.  | La educación rural como base de la sostenibilidad .....                           | 227 |
| 5.  | Innovación tecnológica y gestión del conocimiento .....                           | 227 |
| 6.  | Extensión agrícola y transferencia tecnológica .....                              | 228 |
| 7.  | Educación ambiental y cultura del suelo .....                                     | 229 |
| 8.  | Desafíos y proyecciones .....                                                     | 229 |
| 8.1 | Indicadores de gobernanza del suelo .....                                         | 230 |
| 8.2 | Enfoques internacionales de medición: el marco FAO-SWSR .....                     | 230 |
| 8.3 | Indicadores operativos de gobernanza del suelo .....                              | 231 |
| 8.4 | Adaptación al contexto nacional ecuatoriano .....                                 | 232 |
| 8.5 | Metodologías para el seguimiento local .....                                      | 234 |
| 8.6 | Interpretación de los indicadores y toma de decisiones .....                      | 234 |
| 8.7 | Conclusión: hacia una gobernanza del suelo basada en evidencia<br>235             |     |
| 9.  | Casos de éxito y estrategias regionales .....                                     | 235 |
| 9.1 | Ecuador: conservación edáfica y gobernanza territorial .....                      | 235 |
| 9.2 | Cuba: manejo integral y políticas de restauración edáfica ....                    | 236 |
| 9.3 | Colombia: gestión integrada del territorio y conservación<br>agroecológica .....  | 237 |
| 9.4 | Síntesis comparativa regional .....                                               | 238 |
| 10. | Conclusiones: hacia una política integrada de suelos sostenibles<br>238           |     |
| 8.1 | Elementos clave de una política integrada .....                                   | 238 |
| 8.2 | Desafíos para América Latina y el Ecuador .....                                   | 239 |
| 8.3 | Proyección hacia el futuro .....                                                  | 239 |
|     | CAPÍTULO X: QUÍMICA DE SUELOS Y SU APLICACIÓN EN LA INGENIERÍA<br>AMBIENTAL ..... | 241 |

|     |                                                                         |     |
|-----|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1.  | Introducción: el suelo como sistema químico y ambiental.....            | 241 |
| 2.  | Componentes químicos del suelo .....                                    | 242 |
| 2.1 | Fases del suelo: interacciones y equilibrios .....                      | 242 |
| 2.2 | Minerales primarios y secundarios .....                                 | 243 |
| 2.3 | Materia orgánica del suelo (MOS).....                                   | 244 |
| 2.4 | La solución del suelo: equilibrio iónico y ácido–base.....              | 244 |
| 2.5 | Síntesis aplicada al contexto ecuatoriano .....                         | 245 |
| 3.  | Propiedades químicas relevantes para la gestión ambiental.....          | 245 |
| 3.1 | pH y capacidad buffer del suelo .....                                   | 246 |
| 3.2 | Capacidad de intercambio catiónico (CIC) y aniónico (CIA) ...           | 246 |
| 3.3 | Potencial redox (Eh) y procesos de oxidación–reducción .....            | 247 |
| 3.4 | Conductividad eléctrica (CE) y salinidad.....                           | 248 |
| 3.5 | Adsorción y complejación de contaminantes .....                         | 248 |
| 4.  | Contaminación y procesos de retención en suelos.....                    | 249 |
| 4.1 | Mecanismos de retención en el suelo.....                                | 249 |
| 4.2 | Comportamiento de metales pesados en el suelo.....                      | 250 |
| 4.3 | Persistencia y degradación de contaminantes orgánicos .....             | 251 |
| 4.4 | Transporte y movilidad de contaminantes .....                           | 252 |
| 4.5 | El suelo como barrera natural en vertederos y zonas industriales<br>252 |     |
| 5.  | Química del suelo y calidad ambiental.....                              | 253 |
| 5.1 | Indicadores químicos de contaminación del suelo .....                   | 253 |
| 5.2 | Interacciones suelo–agua–atmósfera .....                                | 255 |
| 5.3 | Impacto de la acidificación y salinización.....                         | 255 |
| 5.4 | Procesos de inmovilización y biodisponibilidad de<br>contaminantes..... | 256 |
| 5.5 | Relevancia ambiental e ingenieril .....                                 | 257 |
| 6.  | Técnicas analíticas y monitoreo químico del suelo .....                 | 257 |
| 6.1 | Muestreo y conservación de muestras edáficas .....                      | 257 |
| 6.2 | Métodos instrumentales de análisis químico.....                         | 258 |

|      |                                                                                 |     |
|------|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.3  | Análisis de fertilidad vs. análisis ambiental .....                             | 260 |
| 6.4  | Protocolos y normativas internacionales .....                                   | 261 |
| 6.5  | Importancia del monitoreo continuo .....                                        | 261 |
| 7.   | Remediación química y biogeoquímica del suelo .....                             | 262 |
| 7.1  | Neutralización de suelos ácidos y alcalinos.....                                | 262 |
| 7.2  | Fitorremediación, biosorción y enmiendas naturales.....                         | 263 |
| 7.3  | Tecnologías de oxidación avanzada (AOPs) .....                                  | 264 |
| 7.4  | Sinergia entre procesos químicos y biológicos en la descontaminación .....      | 264 |
| 7.5  | Perspectivas y desafíos.....                                                    | 265 |
| 8.   | Aplicaciones ambientales y casos de estudio.....                                | 266 |
| 8.1  | Tratamiento de efluentes y retención de contaminantes en filtros de suelo ..... | 266 |
| 8.2  | Gestión de residuos mineros y lixiviados .....                                  | 267 |
| 8.3  | Recuperación de suelos salinos y contaminados por hidrocarburos .....           | 267 |
| 8.4  | Experiencias ecuatorianas en monitoreo y restauración de suelos agrícolas.....  | 268 |
| 8.5  | Conclusiones y perspectivas.....                                                | 269 |
| 9.   | Integración profesional: química del suelo en la Ingeniería Ambiental           | 269 |
| 9.1  | Competencias ambientales vinculadas .....                                       | 270 |
| 9.2  | Ejemplos de proyectos interdisciplinarios.....                                  | 270 |
| 9.3  | Rol del ingeniero ambiental en la gestión edáfica sostenible                    | 271 |
| 9.4  | Reflexión final: hacia una práctica ambiental integrada .....                   | 272 |
| 10.  | Conclusiones y desafíos.....                                                    | 272 |
| 10.1 | Hacia una química de suelos orientada a la resiliencia ecológica                | 273 |
| 10.2 | Retos de investigación y desarrollo tecnológico .....                           | 273 |
| 10.3 | Perspectivas para el Ecuador y América Latina hacia 2030                        | 274 |
| 10.4 | Reflexión final .....                                                           | 275 |

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 276



# TEMA I: EL PERFIL DEL SUELO, SUS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS Y PROPIEDADES COMO VÍA PARA ESTABLECER SU USO, CONSERVACIÓN Y MEJORAMIENTO.

## TITULO: OBSERVACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DEL PERFIL.

### 1. Introducción

#### 1.1 Definición de la morfología del suelo

La **morfología del suelo** es una rama de la pedología que se dedica al estudio de las características visibles y descriptibles del suelo en su estado natural. Esta disciplina se enfoca en los aspectos externos y observables de los suelos, tales como su **color**, **textura**, **estructura**, **consistencia**, y los cambios que se producen a lo largo del perfil del suelo. Las propiedades morfológicas no solo permiten la identificación de tipos de suelos, sino que también proporcionan información crucial sobre los **procesos edafogenéticos** que los formaron, como la **genesis** y evolución del suelo, así como su **fertilidad** y **capacidad productiva**.

#### 1.2 Importancia de la morfología en la pedología

La morfología del suelo es de vital importancia dentro de la **pedología**, ya que proporciona las bases para la **clasificación**, **diagnóstico** y **manejo** del suelo. Al estudiar las características visibles de los suelos, los pedólogos pueden inferir las **condiciones ambientales** que contribuyen a la formación del suelo, tales como el **clima**, el **relieve**, el **material parental**, la **vegetación** y el **tiempo**. Además, la morfología del suelo se convierte en un indicador clave para **evaluar la aptitud agrícola** y la **capacidad ambiental** del suelo para soportar diferentes usos, como la agricultura, la ganadería o la conservación

de ecosistemas. La comprensión de las características morfológicas permite a los profesionales realizar **diagnósticos más acertados**, que son esenciales para **elaborar estrategias de manejo sostenible y mejoramiento** del suelo.

### 1.3 Relación entre morfología del suelo y su aptitud agrícola y ambiental

La relación entre la **morfología del suelo** y su **aptitud agrícola y ambiental** radica en que las características morfológicas del suelo afectan directamente su **fertilidad, capacidad de retención de agua, aireación, y disponibilidad de nutrientes**. Por ejemplo, suelos con una textura arenosa permiten un drenaje rápido, pero tienen una baja capacidad para retener nutrientes, lo cual puede limitarlos para la agricultura en climas secos. Por otro lado, los suelos arcillosos tienen una mayor capacidad de retención de agua y nutrientes, pero pueden presentar problemas de **compactación y baja aireación**, lo que podría afectar negativamente a las raíces de las plantas. Además, la **estructura del suelo**, que refleja la disposición de las partículas y la porosidad, juega un papel crucial en el **desarrollo radicular** y la **accesibilidad de los nutrientes**.

Desde un punto de vista ambiental, las propiedades morfológicas también son clave para la **prevención de la erosión**, la **conservación de la biodiversidad** y la **gestión del agua**. Un suelo con una estructura bien desarrollada y una buena capacidad de drenaje es menos susceptible a la compactación y a la escorrentía superficial, lo que contribuye a una mejor **gestión de los recursos hídricos** y una menor **degradación del suelo**. En resumen, la morfología del suelo ofrece un conjunto de herramientas para la **evaluación integral** de suelos tanto en términos de su **potencial agrícola** como de su **impacto ambiental**.

## 2. Atributos Morfológicos del Suelo

### 2.1 Color

#### *Indicadores y tipos de color del suelo*

El color del suelo proporciona información crucial sobre su contenido de materia orgánica, su estado de oxidación-reducción, el drenaje y la composición mineral. El color de los suelos varía según la presencia de ciertos minerales y la actividad biológica en el suelo. Los colores típicos incluyen:

- **Rojos y amarillos:** Indican la presencia de óxidos de hierro ( $\text{Fe}^{3+}$ ) como la hematita o goethita, lo que generalmente sugiere un buen drenaje.

- **Grises y azulados:** Reflejan condiciones anaeróbicas debido a la reducción de hierro ( $\text{Fe}^{2+}$ ), típicamente asociados a suelos mal drenados.
- **Negros o grises oscuros:** Sugieren un alto contenido de materia orgánica o humus.
- **Blancos o claros:** Se relacionan con la presencia de cuarzo, caliza o sales solubles.

### ***Uso de la Tabla de Colores de Munsell***

Para evitar la subjetividad en la identificación del color, se utiliza la **Tabla de Colores de Munsell**, que clasifica el color según tres variables:

- **Hue (tono):** El color dominante, como amarillo (Y) o rojo (R).
- **Value (valor):** El grado de claridad u oscuridad del color (de 0 = negro absoluto a 8 = blanco absoluto).
- **Chroma (croma):** La intensidad o pureza del color (baja para tonos pardo, alta para tonos vivos como rojo brillante).

Un ejemplo de registro sería: 5YR 4/6, lo que indica un rojo amarillento con un valor de 4 y un croma de 6.

### ***Ejemplos de colores en suelos y su interpretación***

La interpretación de los colores del suelo puede indicar su fertilidad y capacidad de drenaje. Por ejemplo, suelos rojos bien oxidados suelen ser ricos en nutrientes y adecuados para la agricultura, mientras que los suelos grises pueden presentar problemas de drenaje y aeración, afectando negativamente el desarrollo de las raíces.

## **2.2 Textura**

### ***Definición de textura del suelo***

La textura del suelo se refiere a la proporción relativa de partículas minerales de diferente tamaño: arena (2–0.05 mm), limo (0.05–0.002 mm) y arcilla (< 0.002 mm). La textura influye en varias propiedades del suelo, como la capacidad de retención de agua, la permeabilidad y la aireación.

### ***Método de estimación de textura (prueba del rollito)***

En campo, la textura se estima mediante la prueba del rollito o prueba táctil. Este método consiste en humedecer una muestra de suelo y moldearla en forma de un cordón o "rollito". Según su comportamiento, el suelo se clasifica en:

- **Áspero:** Predominio de arena.

- Suave y sedoso (como talco): Predominio de limo.
- Pegajoso y plástica: Predominio de arcilla.

La forma en que el rollito se dobla o se rompe proporciona información sobre la textura predominante.

### ***Impacto de la textura en propiedades del suelo***

La textura del suelo impacta directamente en su capacidad de retención hídrica (suelo arcilloso retiene más agua), la infiltración (suelos arenosos permiten un drenaje más rápido), y la susceptibilidad a la erosión (suelos arenosos son más propensos a la erosión). Además, su capacidad de aireación y accesibilidad de nutrientes dependen de la proporción de arcilla, limo y arena en el suelo.

## **2.3 Estructura**

### ***Tipos de estructuras del suelo***

La estructura del suelo es la disposición de las partículas de suelo en agregados o peds. Los principales tipos estructurales son:

- **Laminar:** Capas delgadas y paralelas, típicas de suelos compactados.
- **Prismática o columnar:** Peds verticales alargados, comunes en suelos con sodicidad.
- **Bloques subangulares o angulares:** Comunes en horizontes B desarrollados.
- **Granular o grumosa:** Característica de los horizontes superficiales, ricos en humus, ideales para las raíces.

### ***Relación entre estructura y aireación, drenaje, porosidad***

La estructura influye en la aireación y drenaje del suelo. Suelos con una estructura granular o grumosa suelen tener mayor porosidad, lo que mejora la circulación de aire y el drenaje. Suelos con estructura laminar pueden presentar baja permeabilidad y compactación, lo que dificulta el crecimiento de las raíces.

## **2.4 Consistencia**

### ***Definición y clasificación de la consistencia***

La consistencia del suelo refleja la resistencia del suelo a la deformación o ruptura. Se clasifica en dos condiciones:

- Plasticidad (suelo húmedo):
- Muy plástica → Forma un cordón duro.
- Plástica → Cordón deformable con presión moderada.
- Ligeramente plástica → Se deforma fácilmente.
- No plástica → No forma cordón.
- Compacidad (suelo seco):
- Extremadamente firme → No penetra el cuchillo.
- Muy firme → Penetra con dificultad.
- Firme → Resistencia moderada.
- Friable → Penetra fácilmente.
- Suelto → Se desmenuza al tocarlo.

### ***Importancia para el crecimiento de raíces y laboreabilidad del suelo***

La consistencia del suelo es crucial para el crecimiento de las raíces y la laboreabilidad. Suelos con alta plasticidad pueden ser difíciles de trabajar y limitan la penetración de las raíces, mientras que suelos sueltos son fáciles de manejar, pero pueden carecer de nutrientes.

## **2.5 Neoformaciones y Concreciones**

### ***Definición de neoformaciones***

Las neoformaciones son acumulaciones o precipitados químicos que aparecen en el perfil del suelo a través de procesos de translocación o diferenciación. Estas incluyen manchas, nódulos, concreciones, películas o cutanes de sales solubles, óxidos de Fe y Mn, y acumulaciones de materia orgánica.

### ***Ejemplos comunes y su relación con procesos edafogenéticos***

Las concreciones calcáreas o ferruginosas indican procesos de carbonatación o laterización, respectivamente, lo que puede ser un indicio de las condiciones de humedad y pH del suelo, así como la profundidad del agua freática o el lavado activo en el suelo.

## **2.6 Inclusiones**

### ***Tipos de inclusiones en el suelo***

Las inclusiones son cuerpos ajenos a la masa del suelo que no tienen relación genética con el perfil del suelo, como fragmentos de conchas, huesos, carbones, o artefactos.

### ***Importancia para interpretar el contexto sedimentológico***

La presencia de inclusiones permite reconstruir el contexto sedimentológico o antropogénico del suelo, lo que proporciona información adicional sobre los procesos geológicos y la historia del área.

## **2.7 Piedras y Gravas**

### ***Impacto de las fracciones gruesas en la densidad aparente y el laboreo***

Las piedras y gravas en el suelo afectan la densidad aparente, la laboreabilidad y la infiltración del agua. Las gravas más grandes (> 20 mm) dificultan el trabajo del suelo y pueden afectar el crecimiento de las raíces.

## **2.8 Desarrollo Radical**

### ***Clasificación de las raíces en el suelo y su importancia agronómica***

El desarrollo radical se clasifica según la abundancia de raíces:

- Abundantes
- Frecuentes
- Pocas

La profundidad y distribución de las raíces son fundamentales para la capacidad de uso agrícola de un suelo, ya que las raíces determinan la accesibilidad a los nutrientes y agua.

## **2.9 Transición entre Horizontes**

### ***Características de la transición entre horizontes***

La transición entre horizontes se describe según su agudeza:

- Abrupta (< 2 cm)
- Nítida (2–5 cm)
- Gradual (5–15 cm)
- Difusa (> 15 cm)

Impacto de las transiciones abruptas, nítidas, y graduales  
Las transiciones abruptas pueden indicar cambios rápidos en las condiciones del suelo, como la presencia de capas impermeables, mientras que las transiciones graduales suelen asociarse con una mayor heterogeneidad del perfil.

## 2.10 Presencia de Carbonatos

### *Métodos de detección (ensayo con HCl)*

Los carbonatos se detectan mediante el ensayo con ácido clorhídrico (HCl al 10%), donde se observa la efervescencia generada por el desprendimiento de CO<sub>2</sub>.

### *Interpretación y relevancia de los carbonatos en suelos áridos y semiáridos*

La presencia de carbonatos en el suelo indica condiciones áridas o semiáridas y puede generar limitaciones nutricionales al bloquear la disponibilidad de micronutrientes como Fe y Zn.

## 3. Estudio del Perfil del Suelo

### 3.1 Reconocimiento del Área

#### *Observación de la topografía, vegetación y signos de erosión*

El reconocimiento del área es el primer paso en el estudio del perfil del suelo. Consiste en recorrer la zona de estudio y observar varios factores clave que pueden influir en las características del suelo. Entre los aspectos a evaluar se encuentran:

- **Topografía:** El relieve del área determina los procesos de escorrentía, erosión y acumulación de materiales. Zonas en pendiente suelen ser más susceptibles a la erosión.
- **Vegetación:** El tipo de vegetación indica las condiciones hídricas y de fertilidad del suelo. La vegetación halófila, por ejemplo, sugiere suelos salinos, mientras que vegetación más densa puede indicar suelos fértiles.
- **Signos de erosión:** La erosión superficial o la compactación del suelo son indicios de que el área está siendo degradada, lo que afectará tanto las propiedades morfológicas como la capacidad agrícola del suelo.

Este reconocimiento permite identificar los puntos más representativos del área para proceder con la excavación de las calicatas, asegurando que la muestra obtenida sea representativa del suelo en su estado natural.

### 3.2 Apertura de la Calicata

#### *Proceso y herramientas necesarias*

La apertura de la calicata es el proceso mediante el cual se excava un pozo de observación para examinar el perfil del suelo. Este procedimiento debe realizarse con cuidado para no alterar las características del perfil.

- **Herramientas necesarias:** Las herramientas comunes para abrir una calicata incluyen una pala, una barreta, o un cuchillo de suelo. Para obtener un perfil claro y representativo, también se pueden utilizar herramientas más especializadas como una barrena o recolector metálico.

### ***Dimensiones recomendadas para las calicatas***

La calicata debe tener dimensiones adecuadas para asegurar una buena observación y evaluación del perfil del suelo:

- **Longitud:** Aproximadamente 2 m.
- **Ancho:** Aproximadamente 1 m.
- **Profundidad:** La profundidad de la calicata depende del tipo de suelo y la profundidad del material parental o roca madre. Se recomienda que la calicata alcance al menos los 2 metros de profundidad o hasta el material original que no haya sido alterado por procesos pedogénicos.

La calicata debe ser excavada en dirección este-oeste, para maximizar la iluminación solar y permitir una mejor visualización de las características morfológicas.

## **3.3 Preparación del Perfil**

### ***Métodos para perfilar las paredes de la calicata***

Una vez excavada la calicata, es esencial preparar las paredes del perfil para una observación adecuada. Para ello, se deben eliminar las irregularidades pequeñas en las paredes utilizando una espátula o cuchillo de suelo. Es fundamental evitar compactar las capas de suelo al realizar esta operación, ya que una correcta visualización depende de que el perfil permanezca intacto.

Es recomendable trabajar en una de las paredes del perfil (preferentemente la que recibe mayor iluminación) para visualizar correctamente los detalles de las transiciones entre horizontes, los cambios de color, textura y otras características morfológicas.

### ***Importancia de la correcta visualización de las características morfológicas***

Una correcta visualización del perfil del suelo es fundamental, ya que permite observar con precisión las características morfológicas como la textura, color, estructura y transición entre horizontes. Estos elementos son cruciales para el diagnóstico de las propiedades físicas del suelo y para determinar su capacidad agrícola, su aptitud para la conservación ambiental y su resistencia a la erosión.

### **3.4 Delimitación de Horizontes**

#### ***Identificación y medición de los horizontes***

La identificación de los horizontes del suelo es una de las tareas clave en el estudio morfológico. Un horizonte es una capa del perfil que presenta características distintas respecto a la capa adyacente, ya sea por su color, textura, estructura, o el contenido de materia orgánica o raíz.

Los horizontes se identifican de acuerdo con sus características y se etiquetan con letras genéticas, por ejemplo:

- **Horizonte A:** Capa superficial rica en materia orgánica, que es crucial para el crecimiento de las plantas.
- **Horizonte B:** Capa subsuperficial que recibe las sustancias lixiviadas de la capa A, a menudo presenta mayor concentración de minerales.
- **Horizonte C:** Material parental o roca madre, sin alteraciones significativas por los procesos pedogénicos.

Cada horizonte se mide cuidadosamente, y se debe registrar su profundidad o espesor en centímetros para facilitar su interpretación.

#### ***Ejemplo de una descripción de horizontes***

Un ejemplo típico de descripción de horizontes podría ser el siguiente:

- **Horizonte A:** 0 – 28 cm, textura franco-arenosa, color marrón oscuro (7.5YR 3/4), alta cantidad de materia orgánica.
- **Horizonte B:** 28 – 45 cm, textura arcillosa, color marrón claro (10YR 5/6), presencia de raíces escasas.
- **Horizonte C:** 45 – 80 cm, material parental rocoso, sin presencia de raíces ni materia orgánica significativa.

### **3.5 Caracterización de Factores Formadores**

***Factores como el clima, relieve, material parental y su influencia en el perfil del suelo***

La caracterización de los factores formadores del suelo es crucial para comprender las propiedades morfológicas observadas en el perfil. Estos factores incluyen:

- **Clima:** El clima influye en la humedad y la temperatura del suelo, lo que a su vez afecta la descomposición de la materia orgánica y la formación de horizontes.
- **Relieve:** El relieve determina el flujo de agua en el suelo, la erosión y la acumulación de material en ciertas áreas.
- **Material parental:** El tipo de material original de que se forma el suelo influye en su composición mineral y en sus propiedades químicas.
- **Vegetación:** El tipo de vegetación que cubre el suelo afecta la acumulación de materia orgánica y la formación de la capa superficial del suelo.

Cada uno de estos factores influye en la genesis del suelo y en la evolución de sus características morfológicas, determinando finalmente su aptitud para diferentes usos.

## 4. Interpretación de los Resultados Morfológicos

### 4.1 Relación entre las características morfológicas y las limitaciones agroproductivas

La interpretación de las características morfológicas del suelo es fundamental para evaluar su aptitud agrícola. Cada atributo morfológico (color, textura, estructura, consistencia, etc.) proporciona información crucial sobre cómo el suelo interactúa con las plantas y su capacidad para sustentar diferentes tipos de cultivos. Las limitaciones agroproductivas son aquellas características o condiciones del suelo que pueden afectar el crecimiento de las plantas y la productividad agrícola. La relación entre las características morfológicas y estas limitaciones es la siguiente:

- **Textura del suelo:** Los suelos arenosos, aunque bien drenados, tienden a ser menos fértiles porque tienen una baja capacidad de retención de agua y nutrientes. En contraste, los suelos arcillosos tienen una mayor capacidad de retención de agua y nutrientes, pero pueden volverse compactos y poco aireados, lo que puede limitar el desarrollo radicular y reducir la infiltración de agua.
- **Estructura del suelo:** Una estructura granular o grumosa favorece la circulación de aire y el drenaje, lo que mejora las condiciones para el crecimiento de las raíces. Sin embargo, suelos con estructura laminar o prismática pueden sufrir problemas de compactación, lo que

afecta la penetración de las raíces y dificulta la absorción de agua y nutrientes.

- **Consistencia:** Suelos con alta plasticidad o compacidad dificultan la penetración de las raíces y pueden ser propensos a la compactación. En estos casos, la laboreabilidad del suelo es limitada, lo que puede afectar la capacidad para sembrar y cultivar.
- **Color:** El color del suelo es un indicador indirecto de su contenido de materia orgánica. Suelos oscuros, ricos en materia orgánica, tienden a ser más fértiles y aptos para la agricultura. Por el contrario, suelos muy claros o salinos pueden tener bajas concentraciones de nutrientes y ser más propensos a la erosión.

En resumen, las características morfológicas proporcionan una visión inicial de las limitaciones agroproductivas de un suelo. Estas limitaciones deben ser cuidadosamente evaluadas para desarrollar estrategias de manejo que maximicen la productividad agrícola.

#### 4.2 Cómo los análisis de campo y laboratorio se complementan para un diagnóstico efectivo

El análisis de campo, que se basa en la observación directa del perfil del suelo, es fundamental para identificar las características visibles y **morfológicas** del suelo, pero tiene limitaciones. Mientras que la descripción visual en campo permite identificar **colores, texturas y estructuras**, los análisis de **laboratorio** proporcionan información más precisa y cuantitativa sobre **propiedades químicas y físicas** que no pueden evaluarse solo con la observación.

Por ejemplo:

- **En campo**, se puede observar que un suelo tiene una textura arcillosa, pero para determinar su **capacidad de intercambio catiónico (CIC)** o su **nivel de acidez**, es necesario realizar análisis de laboratorio que permitan medir el pH, la **materia orgánica**, y otros parámetros químicos que afectan la **fertilidad** y la **capacidad de retención de nutrientes**.
- **Los análisis de laboratorio** permiten también verificar las condiciones del suelo en términos de **salinidad, sodicidad** y otros factores que no son visibles a simple vista pero que influyen significativamente en la **aptitud agrícola** del suelo.

Por lo tanto, el **diagnóstico efectivo** requiere de un enfoque integrado que combine los resultados obtenidos de la **observación morfológica en campo** y los **análisis químicos, físicos y biológicos en laboratorio**. Esta integración

permite a los agrónomos hacer recomendaciones basadas en una comprensión completa de las condiciones del suelo, optimizando así las estrategias de manejo agrícola.

#### **4.3 Ejemplos de limitantes agroproductivas visibles: erosión, compactación, drenaje deficiente**

Al observar un perfil del suelo en campo, es posible identificar varias limitaciones agroproductivas visibles que afectan la capacidad del suelo para sustentar cultivos. Algunos de los ejemplos más comunes incluyen:

##### ***Erosión***

La erosión del suelo es una limitación visible que puede observarse en la superficie del suelo o en las transiciones entre horizontes. Su presencia suele estar indicada por:

- **Corte abrupto o superficies desniveladas**, donde el suelo ha sido removido por el agua o el viento.
- **Presencia de partículas finas o sedimentos depositados** en áreas donde se ha producido **escorrentía**.
- La erosión reduce la **capacidad de retención de agua** del suelo, afecta la **fertilidad** y destruye el perfil superficial rico en materia orgánica.

##### ***Compactación***

La **compactación** del suelo puede ser observada cuando el perfil presenta:

- **Horizontes duros y densos** que no permiten una fácil penetración de las raíces.
- **Formación de capas endurecidas** (prismáticas o laminares), que dificultan el paso del agua y los nutrientes hacia las raíces.

La compactación reduce la **porosidad del suelo**, disminuye la **aireación** y afecta negativamente el **crecimiento de las raíces** y la **infiltración del agua**, lo que limita la productividad agrícola.

##### ***Drenaje deficiente***

El **drenaje deficiente** es otro ejemplo común de limitación agroproductiva visible:

- **Coloración gris o azulada** en los horizontes del suelo, que indica condiciones **anaeróbicas** debido a la **reducción de hierro** ( $\text{Fe}^{2+}$ ).
- **Acumulación de agua en la superficie** o en las capas profundas del suelo, lo que evidencia un **bajo índice de permeabilidad**.

El drenaje deficiente puede causar **encharcamiento** en suelos agrícolas, lo que afecta la **aeración de las raíces**, **bloquea la absorción de nutrientes** y favorece el desarrollo de enfermedades radicales.

En conjunto, la observación de estos problemas morfológicos permite una rápida identificación de las limitaciones que afectan la **capacidad de uso agrícola** del suelo. Sin embargo, para hacer un diagnóstico completo, se deben complementar con los análisis de laboratorio mencionados anteriormente.

## **5. Toma de Muestras del Suelo**

### **5.1 Fundamentos del Muestreo**

#### ***Importancia de un muestreo representativo***

El muestreo representativo es crucial en el estudio de los suelos, ya que permite obtener una muestra que refleje fielmente las propiedades y características del suelo en un área determinada. Un muestreo representativo asegura que los análisis realizados a partir de la muestra puedan ser extrapolados con precisión al resto del área de estudio, garantizando que los resultados sean aplicables y útiles para el diagnóstico edafológico. Si el muestreo no es representativo, los resultados obtenidos en laboratorio podrían no reflejar la verdadera naturaleza del suelo, llevando a decisiones incorrectas sobre su manejo y uso.

#### ***Los errores de muestreo y su impacto en los resultados***

Los errores de muestreo pueden ocurrir debido a varios factores, tales como la selección inadecuada de las zonas de muestreo, la mezcla de materiales con diferentes propiedades o la toma de muestras en condiciones no representativas (como terrenos recientemente arados o fertilizados). Estos errores pueden afectar significativamente la precisión y fiabilidad de los resultados obtenidos, ya que pueden generar resultados sesgados que no reflejan las características reales del suelo. En estudios edafológicos, los errores de muestreo suelen ser entre 5 y 10 veces mayores que los errores analíticos de laboratorio, lo que subraya la importancia de una correcta planificación y ejecución del muestreo.

### **5.2 Principios Básicos del Muestreo**

#### ***Secuencia, herramientas y procedimientos adecuados***

Para realizar un muestreo adecuado, es esencial seguir una secuencia lógica que garantice que las muestras sean representativas del perfil del suelo. Los pasos incluyen:

- **Secuencia de muestreo:** Siempre se debe comenzar desde los horizontes inferiores hacia los superiores, para evitar la contaminación de las capas profundas con material suelto de las capas superficiales.
- **Herramientas adecuadas:** Es crucial usar las herramientas correctas para obtener muestras sin alterar las propiedades del suelo. Algunas herramientas comunes incluyen la espátula, el cuchillo de suelo, la barrena, y el recolector metálico. En suelos con horizontes gruesos, es recomendable muestrear preferentemente la zona central de estos horizontes, ya que suelen ser más estables y menos alteradas.
- **Procedimientos adecuados:** El suelo debe ser extraído de manera que no se mezcle con materiales de capas adyacentes, y la muestra debe ser homogénea. Las muestras deben ser colocadas en bolsas de polietileno o recipientes rígidos y sellados para evitar la contaminación cruzada.

### 5.3 Control de Calidad en el Muestreo

#### *Protocolos para asegurar la validez de los resultados*

Un adecuado control de calidad (QA/QC) es fundamental para asegurar la validez de los resultados del muestreo. Algunos protocolos clave incluyen:

- **Duplicados de campo:** Al menos el 10% de las muestras deben ser duplicadas para verificar la reproducibilidad de los resultados. Esto ayuda a detectar cualquier error sistemático en la toma de muestras.
- **Muestras en blanco:** Utilizar envases vacíos (sin suelo) para detectar cualquier tipo de contaminación cruzada que pueda ocurrir durante el proceso de muestreo o transporte de las muestras.
- **Registro fotográfico y georreferenciación:** Es fundamental tomar fotografías georreferenciadas de cada muestra con sus respectivas coordenadas GPS. Esto asegura que las muestras puedan ser rastreadas y verificadas en el futuro si es necesario.
- **Cuaderno de campo:** Anotar todas las condiciones climáticas, la humedad del suelo, y cualquier observación relevante durante el proceso de muestreo. La firma del responsable también debe constar en el cuaderno para garantizar la trazabilidad del procedimiento.

## 5.4 Muestreo en Campos Experimentales

### *Diseño y ejecución del muestreo en parcelas experimentales*

El diseño del muestreo en campos experimentales debe reflejar la heterogeneidad espacial del suelo. Para garantizar que las muestras sean representativas de las condiciones del terreno, el diseño debe seguir los siguientes principios:

- **En parcelas grandes:** Se recomienda tomar entre 15 y 20 submuestras distribuidas en forma de zigzag o patrón en "W" a través de la parcela. Este diseño aumenta la representatividad de la muestra y permite una mejor estimación de las propiedades del suelo.
- **En parcelas pequeñas:** Se pueden tomar 8 a 10 submuestras, suficientes para obtener una muestra compuesta representativa.

Las submuestras deben ser mezcladas homogéneamente para formar una muestra compuesta de alrededor de **1 kg**, que luego se analizará en laboratorio.

### *Profundidades de referencia:*

- **Capa arable:** 0–20 cm, que es donde interactúan las raíces de las plantas y donde se realizan las prácticas agrícolas más comunes.
- **Subsuelo:** 20–40 cm, que tiene importancia para el almacenamiento de agua y las reservas minerales.

## 5.5 Preparación Previa del Estudiante

### *Conocimientos previos requeridos para la práctica de campo*

Antes de realizar la práctica de campo, el estudiante debe tener claros varios conceptos y procedimientos técnicos:

- Diferenciación de horizontes y subhorizontes genéticos, incluyendo la nomenclatura WRB 2022 y USDA Soil Taxonomy.
- Requisitos teóricos fundamentales sobre morfología, textura, estructura, color y consistencia del suelo, así como los procedimientos técnicos para tomar muestras.
- Procedimientos de seguridad en campo, incluyendo la trazabilidad de las muestras y las normas de bioética.
- Identificación y resolución de los errores comunes en el muestreo y sus consecuencias.

### *Preguntas de autopreparación sugeridas*

Para garantizar que los estudiantes estén bien preparados para la práctica de campo, se sugiere que reflexionen sobre las siguientes preguntas:

- ¿Qué información aporta cada tipo de perfil (ABC, AC, A(B) C, ¿AD) en la interpretación del desarrollo del suelo?
- ¿Cuáles son las principales características morfológicas que se describen en el perfil?
- ¿Cómo se identifica la presencia de carbonatos y qué indica su efervescencia con HCl al 10 %?
- ¿Por qué es importante conocer las características morfológicas desde el punto de vista agrícola y ambiental?
- ¿Qué consecuencias tiene para el diagnóstico un muestreo no representativo?
- Al muestrear un horizonte, ¿qué parte se selecciona y por qué razón?
- ¿Qué precauciones se deben tomar para evitar contaminación durante el muestreo?
- ¿Qué diferencia existe entre una muestra simple, compuesta y duplicada de control?

## 6. Ejercicios Prácticos

### 6.1 Ejercicio 1: Estudio de Perfil en Campo

#### ***Objetivo***

El objetivo de este ejercicio práctico es permitir que los estudiantes integren la teoría con la experiencia empírica en el campo. La actividad busca que los estudiantes desarrollen habilidades para observar, describir e interpretar las características morfológicas de un perfil de suelo en condiciones naturales. Esto les permitirá aplicar los conocimientos adquiridos sobre los atributos morfológicos del suelo, y desarrollar capacidades de diagnóstico edafológico y manejo del suelo.

#### ***Desarrollo de la práctica***

El ejercicio se desarrollará siguiendo estos pasos:

- 1 **Desplazamiento y selección del sitio:** El grupo de estudiantes, bajo la dirección del docente, se trasladará al área de estudio seleccionada, que puede ser un predio agrícola, área experimental o terreno natural. Se seleccionará un punto representativo que refleje las características del suelo en la zona, evitando áreas alteradas, como bordes de caminos, zonas compactadas o vertederos.
- 2 **Apertura de la calicata:** Con las herramientas adecuadas, se procederá a la excavación de una calicata de aproximadamente 2 m × 1 m y una

profundidad de 1.2–1.5 m, o hasta alcanzar el material parental. La calicata debe abrirse en dirección este-oeste para garantizar una buena iluminación del perfil. Una vez excavada, se procederá a perfilar la pared expuesta del suelo.

- 3 **Observación y descripción del perfil:** Los estudiantes realizarán una descripción morfológica detallada del perfil, registrando las características visibles de cada horizonte. Para ello, utilizarán una ficha de descripción proporcionada por el docente, donde anotarán:
  - Color (usando la Tabla de Colores de Munsell)
  - Textura de campo (por ejemplo, arcillosa, arenosa)
  - Estructura (granular, prismática, laminar)
  - Consistencia (plástica, firme, suelta)
  - Presencia de neoformaciones y concreciones (por ejemplo, manchas, nódulos)
  - Desarrollo radical (abundante, frecuente, escaso)
  - Transición entre horizontes (abrupta, nítida, gradual)
  - Presencia de carbonatos (efervescencia con HCl al 10%)
- 4 **Registro fotográfico y croquis del perfil:** Los estudiantes tomarán fotografías georreferenciadas del perfil de la calicata. Las fotos deben incluir las características de cada horizonte y las transiciones entre ellos. Además, se elaborará un croquis del perfil, indicando los horizontes y las profundidades observadas, así como la orientación de la calicata (este-oeste). Estas imágenes y croquis servirán como complemento visual para la interpretación del perfil.

### ***Evaluación de la descripción morfológica***

La evaluación del ejercicio se basará en los siguientes criterios:

- **Precisión en la descripción:** El uso correcto de la terminología técnica y la claridad en la identificación de los horizontes y sus características.
- **Trabajo en equipo:** La colaboración efectiva entre los estudiantes y el cumplimiento de las normas de seguridad.
- **Registro fotográfico y croquis:** La calidad y la precisión de las fotografías y el croquis elaborados, que deben ser claros y bien documentados.

## **6.2 Ejercicio 2: Análisis de los Resultados**

### ***Interpretación técnica y diagnóstico preliminar de los perfiles de suelo***

Una vez completada la descripción del perfil en campo, los estudiantes procederán con el análisis de los resultados obtenidos. Este ejercicio tiene como objetivo que los estudiantes sean capaces de interpretar las características morfológicas observadas en relación con los procesos edafogenéticos que pudieron haber influido en la formación del suelo. La interpretación técnica debe incluir:

- 1 Diagnóstico de las limitaciones agroproductivas: Los estudiantes deberán identificar las posibles limitantes que afectan la aptitud agrícola del suelo, como la compactación, el drenaje deficiente, la erosión o la presencia de sales. Por ejemplo, si se observa un horizonte con color grisáceo y baja aireación, es posible que el drenaje del suelo sea insuficiente, lo cual podría afectar negativamente la salud radicular y limitar el crecimiento de las plantas.
- 2 Determinación de la capacidad de uso agrícola: Basado en la interpretación de los horizontes y sus características, los estudiantes podrán clasificar el suelo en función de su capacidad productiva para diversos cultivos. Esto incluirá la evaluación de la profundidad efectiva de enraizamiento, la disponibilidad de nutrientes y la capacidad de retención de agua.
- 3 Recomendaciones de manejo: Los estudiantes deberán formular recomendaciones para el manejo y uso sostenible del suelo basado en sus características morfológicas y limitaciones identificadas. Esto puede incluir la enmienda del pH si se detectan carbonatos o la aireación del suelo si se observa compactación.

### ***Conclusiones del análisis***

En base a las observaciones y el análisis de los resultados, los estudiantes deberán entregar un informe con las conclusiones técnicas sobre el estado y la aptitud del suelo estudiado. Este informe debe incluir una descripción detallada de las propiedades del perfil, los resultados del análisis morfológico y las recomendaciones para mejorar o conservar el suelo.

## **7. Conclusiones**

### **7.1 Resumen de la importancia del estudio morfológico en la edafología**

El **estudio morfológico del suelo** constituye la base fundamental para comprender las propiedades físicas del suelo en su estado natural. A través de la observación y descripción de sus **características morfológicas** (color, textura, estructura, consistencia, etc.), los edafólogos pueden inferir los procesos de **genesis, evolución, fertilidad y capacidad productiva** del suelo.

Esta información es crucial para una correcta **clasificación y diagnóstico** de los suelos, y es esencial para determinar su aptitud para diversos usos, como la **agricultura**, la **gestión ambiental** y la **conservación de recursos naturales**.

Además, el estudio morfológico es vital para identificar limitantes agroproductivas visibles, tales como **erosión**, **compactación**, **drenaje deficiente** o la presencia de **sales y concreciones**. Estas limitantes no solo afectan la **productividad agrícola**, sino que también influyen en el **manejo sostenible** del suelo. Por tanto, el análisis morfológico provee un **primer paso esencial** para implementar estrategias de **mejoramiento, conservación y uso sostenible** de los suelos.

El enfoque morfológico también juega un papel clave en la **gestión de la calidad del suelo** a largo plazo, ayudando a preservar los ecosistemas y mejorar la **seguridad alimentaria**, especialmente en el contexto de la creciente **demanda agrícola** y la **degradación de los suelos**.

### ***Aplicaciones prácticas del conocimiento morfológico para el manejo sostenible del suelo***

El conocimiento adquirido a través del estudio morfológico del suelo tiene múltiples aplicaciones prácticas que son fundamentales para la **gestión sostenible** del suelo. Algunas de las aplicaciones más relevantes incluyen:

1. **Diagnóstico y clasificación de suelos:** Los estudios morfológicos permiten clasificar los suelos en diferentes categorías, facilitando la selección de **técnicas de manejo** adaptadas a cada tipo de suelo. Por ejemplo, suelos con una **textura arcillosa** requieren prácticas de manejo específicas para evitar la **compactación** y mejorar la **aireación**.
2. **Gestión de la fertilidad:** La evaluación de la **materia orgánica** y el **color** del suelo proporciona indicios de la **fertilidad** natural del suelo. Esto permite a los agrónomos recomendar **enmiendas** o el uso de fertilizantes de manera más eficiente, optimizando los insumos y promoviendo una **agricultura sostenible**.
3. **Prevención de la erosión:** El análisis de la **estructura** y los **horizontes superficiales** permite identificar áreas con riesgo de **erosión**. En estos casos, se pueden aplicar técnicas de conservación de suelos, como **siembra de cobertura** o **terrazas**, para proteger el suelo y evitar su pérdida.
4. **Mejoramiento del drenaje:** Los suelos con problemas de **drenaje deficiente**, como los que presentan **colores grisáceos** debido a la **reducción de hierro**, requieren tratamientos específicos como el

**dragado de drenajes** o la **aplicación de enmiendas calcáreas** para mejorar la infiltración y la aireación.

5. **Restauración de suelos degradados:** La interpretación de los **procesos edafogenéticos** a partir de la morfología del suelo permite implementar **estrategias de restauración** en suelos degradados, como la corrección de su **acidez** o la **remoción de sales** en suelos salinos.
6. **Manejo adecuado de suelos en áreas experimentales y agrícolas:** El estudio morfológico también se aplica en el **diseño de experimentos agrícolas**, ya que ayuda a determinar las **profundidades** y **tipos de horizontes** en los que se deben tomar muestras. Esto garantiza que los estudios realizados sean representativos del perfil del suelo y que los resultados obtenidos sean aplicables a **condiciones de campo reales**.

En resumen, el estudio morfológico no solo proporciona **información descriptiva** sobre las características del suelo, sino que también es crucial para la implementación de **estrategias de manejo** que promuevan el uso **sostenible** del suelo y contribuyan a la **seguridad alimentaria** global, mejorando la **calidad de vida** y reduciendo los impactos negativos sobre el medio ambiente.

# **TEMA II: EL PERFIL DEL SUELO, SUS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS Y PROPIEDADES COMO VÍA PARA ESTABLECER SU USO, CONSERVACIÓN Y MEJORAMIENTO**

## **TÍTULO: INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS ANALÍTICOS QUÍMICOS, FISICOQUÍMICOS Y BIOLÓGICOS DEL SUELO**

### **1. OBJETIVO**

#### **1.1 Objetivos del Capítulo**

1. Interpretar los resultados analíticos de las propiedades químicas, fisicoquímicas y biológicas del suelo:
  - Analizar las propiedades clave del suelo, como el pH, acidez, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, contenido de carbonatos y actividad microbiana, para comprender su comportamiento y efectos sobre la productividad agrícola.
2. Identificar las limitantes de la agroproductividad del suelo:
  - Determinar las posibles restricciones en la capacidad productiva del suelo, como acidificación, salinización, sodificación, sodicidad, y la presencia de toxinas (como  $\text{Al}^{3+}$  o  $\text{Fe}^{2+}$ ), que puedan afectar negativamente la salud de los cultivos.
3. Establecer recomendaciones de manejo, conservación y mejoramiento:
  - Proponer prácticas adecuadas de manejo agrícola, conservación de suelos y enmiendas basadas en los resultados obtenidos de los análisis, que favorezcan la rehabilitación de suelos degradados y mejoren la fertilidad y resiliencia del sistema suelo-planta.

4. Desarrollar estrategias de uso sostenible para suelos de igual origen o condiciones edáficas semejantes:
  - Establecer directrices para el uso sostenible de suelos con características morfológicas y propiedades fisicoquímicas similares, con el fin de optimizar la producción agrícola sin comprometer la salud a largo plazo del ecosistema edáfico.
5. Facilitar la toma de decisiones en la planificación agrícola y en la gestión de la fertilidad del suelo:
  - Ayudar a los profesionales del área edafológica, agronómica y ambiental a tomar decisiones informadas sobre el manejo de suelos en función de su capacidad natural y las limitaciones identificadas en los análisis.

## 2. INTRODUCCIÓN

La interpretación de los resultados analíticos del suelo constituye una fase esencial en los estudios edafológicos, ya que traduce los valores de laboratorio en criterios agronómicos, ecológicos y de manejo.

Las propiedades **químicas (pH, acidez, materia orgánica, bases intercambiables, carbonatos, sales, etc.)**, junto con las **físico-químicas (capacidad de intercambio catiónico, saturación de bases, relaciones iónicas)** y las **biológicas (actividad microbiana, mineralización de materia orgánica, respiración del suelo)** determinan el comportamiento del ecosistema edáfico y su influencia directa sobre la fertilidad y la productividad de los cultivos.

La comprensión de estas propiedades permite:

- Diagnosticar los **procesos de degradación o mejora del suelo** (acidificación, salinización, sodificación, laterización, humificación).
- Estimar la **capacidad de amortiguamiento y resiliencia** del sistema suelo-planta.
- Determinar la necesidad de **enmiendas, rotaciones o manejo de fertilización adaptado**.

Cada propiedad debe **evaluarse según su valor absoluto y su interacción con otras variables**, utilizando rangos de referencia o umbrales críticos establecidos para los suelos tropicales y subtropicales. A continuación, se presentan las tablas y criterios actualizados de evaluación.

## 2.1 Evaluación del pH (en agua, relación 1:2,5)

El pH del suelo es un indicador clave de la acidez o alcalinidad del suelo, que influye directamente en la disponibilidad de nutrientes y la actividad biológica del suelo. Su medición es esencial para determinar las condiciones óptimas para los cultivos. A continuación, se presenta la tabla con la clasificación del pH y su interpretación correspondiente.

**Tabla 1.** Evaluación del pH en agua, relación 1:2,5

| GAMA DE PH | CALIFICACIÓN          |
|------------|-----------------------|
| < 5,0      | Muy ácido             |
| 5,0 – 5,5  | Ácido                 |
| 5,6 – 6,0  | Medianamente ácido    |
| 6,1 – 6,5  | Ligeramente ácido     |
| 6,6 – 7,5  | Neutro                |
| 7,6 – 8,0  | Ligeramente alcalino  |
| 8,1 – 8,5  | Medianamente alcalino |
| > 8,5      | Alcalino              |

### Interpretación:

El **pH** refleja la **acidez activa** (concentración de iones  $H^+$  en la solución del suelo). Valores menores de 5,5 indican **limitante agroproductiva por elevada acidez**, con posible solubilización de  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$  y  $Mn^{2+}$  a niveles tóxicos. Los valores entre 6,0 y 7,0 son óptimos para la mayoría de los cultivos, mientras que valores superiores a 8,0 pueden indicar **exceso de carbonatos o sodicidad**.

## 2.2 Acidez Potencial o de Reserva

La acidez potencial representa la cantidad total de protones ( $H^+$ ) y cationes ácidos ( $Al^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$ ) retenidos en el complejo de cambio del suelo, tanto en la capa compensadora como en la capa difusa. Esta propiedad es importante ya que influye directamente en la fertilidad del suelo y en la salud radicular de las plantas. La acidez potencial se subdivide en tres componentes:

- Acidez hidrolítica ( $Y_1$ ): Iones  $H^+$  fuertemente retenidos, determinados por intercambio con acetato de sodio ( $NaCH_3COO$ ).
- Acidez cambiante ( $Y_2$ ): Iones  $H^+$ ,  $Al^{3+}$  y  $Fe^{2+}$  intercambiables en la capa difusa del complejo de cambio.
- Acidez tóxica ( $Y_3$ ): Fracción de acidez cambiante debida exclusivamente a cationes tóxicos como  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$ , y  $Mn^{2+}$ .

El análisis de la acidez potencial es clave para evaluar la salud del suelo y determinar la necesidad de enmiendas para mejorar la fertilidad y reducir la toxicidad en suelos muy ácidos.

**Tabla 2.** Evaluación de la Acidez Hidrolítica ( $Y_1$ )

| GAMA (MMOL 100 G <sup>-1</sup> SS) | CALIFICACIÓN |
|------------------------------------|--------------|
| < 1,00                             | Baja         |
| 1,00 – 1,99                        | Media        |
| 2,00 – 3,99                        | Alta         |
| > 3,99                             | Muy alta     |

#### Interpretación:

La acidez hidrolítica ( $Y_1$ ) se refiere a los iones  $H^+$  que están fuertemente retenidos en el complejo de cambio del suelo. Suelos con alta acidez hidrolítica (valores > 3,99 mmol) suelen tener un pH bajo y pueden presentar riesgo de acidificación progresiva, lo que limita la disponibilidad de nutrientes como el calcio ( $Ca^{2+}$ ), magnesio ( $Mg^{2+}$ ) y potasio ( $K^+$ ). Estos suelos son menos productivos y requieren enmiendas para reducir la acidez.

**Tabla 3.** Evaluación de la Acidez Cambiable ( $Y_2$ )

| GAMA (MMOL 100 G <sup>-1</sup> SS) | CALIFICACIÓN |
|------------------------------------|--------------|
| < 1,0                              | Baja         |
| 1,0 – 2,0                          | Media        |
| > 2,0                              | Alta         |

#### Interpretación:

La acidez cambiante ( $Y_2$ ) incluye los iones  $H^+$ ,  $Al^{3+}$  y  $Fe^{2+}$  intercambiables en la capa difusa del complejo de cambio del suelo. Valores elevados de  $Y_2$  indican que el suelo tiene un alto potencial de toxicidad debido a la liberación

de cationes tóxicos como el aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ ). Esto reduce la absorción de nutrientes esenciales y limita la fertilidad del suelo. En suelos con pH similar, aquellos con mayor acidez cambiabile presentan menor productividad y mayor riesgo de acidificación progresiva.

**Tabla 4.** Evaluación de la Acidez Tóxica ( $Y_3$ )

| <b>GAMA (MMOL 100 G<sup>-1</sup> SS)</b> | <b>CALIFICACIÓN</b> |
|------------------------------------------|---------------------|
| <b>&lt; 1,0</b>                          | Baja                |
| <b>1,0 – 2,0</b>                         | Media               |
| <b>&gt; 2,0</b>                          | Alta                |

#### **Interpretación:**

La acidez tóxica ( $Y_3$ ) se refiere a la fracción de la acidez cambiabile debida exclusivamente a cationes tóxicos como el aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ ), hierro ( $\text{Fe}^{2+}$ ) y manganeso ( $\text{Mn}^{2+}$ ). Valores altos en  $Y_3$  indican un riesgo de toxicidad en el suelo, lo que puede inhibir la absorción de calcio, magnesio y fósforo. Esto limita el crecimiento de las plantas y reduce su productividad. En suelos ácidos, la acidez tóxica es una de las principales causas de la degradación del suelo.

#### **Interpretación General de la Acidez Potencial:**

Los valores elevados de  $Y_2$  y  $Y_3$  indican una toxicidad potencial por  $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{Fe}^{2+}$ , lo cual reduce la absorción de nutrientes como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y P. Suelos con pH similar, pero con mayor acidez cambiabile, presentarán menor productividad y mayor riesgo de acidificación progresiva. Es esencial aplicar enmiendas o prácticas de manejo para mitigar la acidez y mejorar las condiciones para el crecimiento de las plantas.

## **2.3 Contenido de materia orgánica (MO)**

**Tabla 6**

| <b>GAMA (%)</b>  | <b>CALIFICACIÓN</b> |
|------------------|---------------------|
| <b>&lt; 1,5</b>  | Muy baja            |
| <b>1,5 – 3,0</b> | Baja                |
| <b>3,1 – 5,0</b> | Media               |
| <b>&gt; 5,0</b>  | Alta                |

**Interpretación:**

La materia orgánica (MO) regula la estructura, retención de agua, CIC (T) y la biodisponibilidad de nutrientes.

Se estima que un incremento del 1 % de MO eleva el valor T en 2 mmol 100 g<sup>-1</sup> de suelo, lo cual evidencia su influencia sobre la fertilidad potencial. Además, la humificación favorece la formación de agregados estables y mejora la aireación y capacidad hidrofísica del suelo.

## **2.4 Capacidad de Intercambio Catiónico Total (Valor T)**

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) total, también conocida como valor T, es una propiedad fundamental que refleja la fertilidad potencial del suelo. El valor T indica la capacidad del suelo para retener cationes intercambiables, como Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, H<sup>+</sup> y Al<sup>3+</sup>. Cuanto mayor sea el valor T, mayor será la capacidad del suelo para retener nutrientes esenciales para las plantas, lo que favorece su crecimiento y productividad.

El valor T depende del contenido y tipo de arcillas y humus presentes en el suelo. Los suelos con una alta proporción de arcillas o materia orgánica tienen una mayor capacidad para retener nutrientes y agua, lo que los hace más fértiles.

**Tabla 7.** Evaluación de la Capacidad de Intercambio Catiónico Total (Valor T)

| GAMA (MMOL 100 G <sup>-1</sup> SS) | CALIFICACIÓN |
|------------------------------------|--------------|
| < 10,0                             | Muy baja     |
| 10,0 – 19,9                        | Baja         |
| 20,0 – 29,9                        | Media        |
| 30,0 – 49,9                        | Alta         |
| > 49,9                             | Muy alta     |

### Interpretación:

El valor T expresa la capacidad total del suelo para retener cationes intercambiables, lo cual refleja su fertilidad potencial. Un valor de  $T < 20$  mmol 100 g<sup>-1</sup> indica suelos con baja fertilidad, que requieren enmiendas o prácticas de manejo para mejorar su capacidad de retención de nutrientes y agua. En suelos con T alta (por encima de 30 mmol 100 g<sup>-1</sup>), la fertilidad es mayor y los nutrientes están más disponibles para las plantas.

Además, el valor T se debe evaluar considerando las proporciones ideales de cationes en el suelo equilibrado. Los valores ideales para un suelo equilibrado son:

- $H^+$ : 20 %
- $Mg^{2+}$ : 12 %
- $Ca^{2+}$ : 60 %
- $K^+$ : 6 %
- $Na^+$ : 2 %

Cuando estas proporciones se alteran, pueden ocurrir antagonismos iónicos, lo que limita la absorción eficiente de nutrientes. Por ejemplo, un exceso de  $K^+$  puede reducir la absorción de  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ , mientras que un exceso de  $Na^+$  puede ocasionar sodicidad y problemas de dispersión del suelo.

## 2.5 Capacidad de cambio de bases (valor S) y saturación de bases (V)

- **S:** suma de cationes básicos ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ).
- **V (%):** grado de saturación de bases =  $(S/T) \times 100$ .

### Interpretación:

- $V < 50$  % → suelos ácidos con deficiencia de bases.
- V entre 50–80 % → fertilidad media.

- $V > 80 \%$  → suelos fértiles o con carbonatos activos.

#### Proporciones catiónicas ideales (de S):

- $Ca^{2+} = 75 \%$
- $Mg^{2+} = 15 \%$
- $K^+ = 7 \%$
- $Na^+ = 3 \%$

#### Relaciones catiónicas críticas:

- $Ca/Mg = 2-6$  (óptimo agronómico).
- $K/Mg = 0,5$ ;  $K/Ca = 0,1$  (equilibrio iónico).  
Desviaciones generan antagonismos: exceso de K reduce absorción de Ca y Mg; exceso de Mg reduce estructura y aireación; exceso de Na causa dispersión y sodificación.

## 2.6 Contenido de Carbonatos ( $CO_3^{2-}$ )

Los **carbonatos** en el suelo son compuestos que pueden afectar de manera significativa la **fertilidad** y la **productividad** agrícola. El **carbonato activo** ( $> 5 \%$ ) puede ser **fitotóxico** para cultivos sensibles, ya que provoca un **pH alcalino** en el suelo, lo que limita la **disponibilidad** de nutrientes esenciales como **hierro (Fe)**, **zinc (Zn)**, **manganeso (Mn)** y **fósforo (P)**. Además, su acumulación puede generar la formación de **horizontes calcáreos (Bk)**, lo que reduce la **profundidad efectiva del suelo** y su **actividad química**.

El exceso de carbonatos provoca un **pH alcalino** (7,5–8,4), lo que no solo limita la **disponibilidad de nutrientes**, sino que también afecta la **actividad biológica del suelo**. Los **horizontes calcáreos** suelen presentar una textura más liviana y menor actividad química, lo que hace que el suelo sea menos adecuado para el cultivo de muchas especies vegetales que requieren un ambiente ligeramente ácido.

**Tabla 8.** Evaluación del Contenido de Carbonatos ( $CO_3^{2-}$ )

| PORCENTAJE DE CARBONATOS | CALIFICACIÓN     |
|--------------------------|------------------|
| $< 5 \%$                 | Bajo             |
| 5 – 10 %                 | Moderado         |
| $> 10 \%$                | Alto (limitante) |

### Interpretación:

Un **contenido bajo de carbonatos** (menos de 5 %) generalmente no representa una limitante significativa para la fertilidad del suelo, aunque puede tener algún impacto en la **disponibilidad de nutrientes** en suelos con texturas muy finas. Sin embargo, cuando el **contenido de carbonatos** supera el 5 %, el suelo puede volverse **fitotóxico** para cultivos sensibles, reduciendo su productividad debido a la **alkalinidad** y la **reducción de la disponibilidad de micronutrientes**. Los suelos con más del 10 % de carbonatos pueden formar **horizontes calcáreos** (Bk), lo que limita la **profundidad efectiva del suelo** y reduce la actividad biológica, afectando gravemente su uso agrícola.

La **acumulación de carbonatos** debe ser monitoreada cuidadosamente, especialmente en suelos de regiones áridas y semiáridas, donde la **precipitación de carbonatos** es más común debido a las **condiciones secas** y al **bajo contenido de materia orgánica**.

## 2.7 Análisis Mineralógico de la Fracción Arcillosa

El análisis de la fracción arcillosa del suelo es fundamental para comprender las propiedades físicas y químicas del mismo. La mineralogía arcillosa influye directamente en la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la plasticidad, la retención de agua, y el comportamiento físico del suelo. Los principales componentes que se analizan son los óxidos mayores de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). A partir de las relaciones moleculares entre estos óxidos, es posible inferir el tipo de arcilla predominante en el suelo y su capacidad para retener nutrientes, su interacción con el agua y su influencia en la fertilidad del suelo.

La relación molecular entre  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  proporciona información sobre los tipos de arcillas presentes, lo que ayuda a predecir su comportamiento en términos de fertilidad y su capacidad para sostener cultivos agrícolas.

**Tabla 1.** Evaluación de la Composición Mineralógica de la Fracción Arcillosa

| RELACIÓN MOLECULAR                                                                              | INTERPRETACIÓN                                               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 > 2,5$ Y SAF<br>( $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ ) > 2 | Arcillas silicatadas tipo 2:1 (montmorillonita, esmectita)   |
| $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 2,5$ Y SAF < 2                                            | Arcillas tipo 1:1 (caolinita)                                |
| $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 2$ Y SAF < 1                                              | Arcillas de hidróxidos (Fe, Al), indicativas de laterización |

### Interpretación:

- Arcillas silicatadas tipo 2:1 (montmorillonita, esmectita):  
Cuando la relación  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  es mayor que 2,5 y el SAF ( $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ ) es superior a 2, se identifican arcillas tipo 2:1, como la montmorillonita o esmectita. Estas arcillas tienen una alta plasticidad y una gran capacidad de retención de agua. Son características de suelos con una capacidad de expansión y contracción, pero pueden presentar problemas de compactación debido a su naturaleza plástica.
- Arcillas tipo 1:1 (caolinita):  
Cuando la relación  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  es menor que 2,5 y el SAF es inferior a 2, se encuentran arcillas tipo 1:1, como la caolinita. Estas arcillas tienen una menor plasticidad y retención de agua en comparación con las arcillas 2:1, lo que les otorga una mejor aireación y drenaje. Sin embargo, su capacidad para retener nutrientes es limitada debido a su baja capacidad de intercambio catiónico (CIC).
- Arcillas de hidróxidos (Fe, Al), indicativas de laterización:  
Cuando la relación  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  es menor que 2 y el SAF es inferior a 1, el suelo contiene arcillas de hidróxidos de hierro y aluminio, típicas de los procesos de laterización. Estas arcillas se encuentran comúnmente en suelos de climas tropicales y subtropicales, donde la alta temperatura y humedad favorecen la descomposición de minerales y la formación de óxidos. Estos suelos tienen una baja fertilidad y requieren enmiendas para mejorar su capacidad de retención de nutrientes.

### Nota:

La mineralogía arcillosa controla aspectos clave como la CIC, plasticidad, retención de agua y el comportamiento físico del suelo. Las arcillas tipo 2:1 tienen una alta capacidad de expansión y contracción, lo que puede afectar la estructura y la laboreabilidad del suelo. Por otro lado, las arcillas tipo 1:1 tienen mejor aireación y drenaje, pero presentan limitaciones en la retención de nutrientes. Los suelos con arcillas de hidróxidos pueden ser pobres en nutrientes debido a la descomposición de minerales y la alta acidez.

## 2.8 Contenido de Sales Solubles Totales (SST)

El **contenido de sales solubles totales (SST)** en el suelo es una propiedad crítica para evaluar la **salinidad** y su impacto en la **fertilidad** del suelo. Las **sales solubles** se determinan a partir de una **suspensión suelo-agua** (1:5), y su concentración se expresa en porcentaje del contenido de **sales solubles** sobre el peso de suelo seco (b.s.s.). Se considera que el suelo presenta

**limitaciones por salinidad** cuando el contenido de SST supera el **1 %** en base a suelo seco.

Las sales solubles en el suelo afectan varios procesos fisiológicos de las plantas, como la **germinación**, la **presión osmótica** y la **estructura del suelo**. Además, la salinidad excesiva puede generar problemas como la **dispersión coloidal** y la **pérdida de estructura del suelo**, lo que reduce su capacidad para retener agua y nutrientes.

**Tabla 9.** Evaluación del Contenido de Sales Solubles Totales (SST)

| CONCENTRACIÓN DE SST (%) | CALIFICACIÓN                |
|--------------------------|-----------------------------|
| < 1 %                    | No limitante por salinidad  |
| 1 – 2 %                  | Moderado (salinidad ligera) |
| > 2 %                    | Limitante por salinidad     |

**Interpretación:**

- < 1 % de SST: Se considera que el contenido de sales solubles no representa una limitante por salinidad, y el suelo es adecuado para la mayoría de los cultivos. La fertilidad no está comprometida y el comportamiento físico del suelo es adecuado.
- 1 – 2 % de SST: Indica una salinidad ligera. Si bien el suelo no presenta limitaciones severas para la germinación y el crecimiento, los niveles de salinidad deben ser monitoreados de cerca. Los suelos arenosos pueden presentar una mayor concentración salina efectiva debido a su baja capacidad de retención.
- > 2 % de SST: Se considera que el suelo está limitado por salinidad, lo que puede afectar gravemente la germinación, la absorción de agua por las plantas y la estructura del suelo. La presión osmótica provocada por el exceso de sales puede dificultar la absorción de agua, y la dispersión coloidal puede afectar la estructura del suelo, provocando su compactación.

**Nota:**

La **concentración efectiva de sales** depende de la **textura** del suelo. Los suelos **arenosos** tienen una mayor concentración salina efectiva debido a su baja capacidad de **retención de agua**. Por lo tanto, los suelos arenosos pueden presentar mayor **salinidad** en comparación con suelos **arcillosos**, que tienen una **mayor capacidad de retención** y pueden **diluir** las sales más eficazmente. La **salinidad** también influye en la **estructura del suelo** y en su

**comportamiento físico**, ya que la **dispersión coloidal** debilita la estructura y reduce la **capacidad de infiltración** del agua.

### 3. PREPARACIÓN PREVIA DEL ESTUDIANTE

Para la correcta ejecución de la práctica, el estudiante deberá:

- **Definir** los conceptos de acidez actual y potencial,  $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_3$ , materia orgánica, humus, valores T, S, V, lixiviación, lavado y sodicidad.
- **Relacionar** el grado de saturación de bases (V) con el pH del suelo.
- **Analizar** la relación entre la cantidad/tipo de arcilla y el valor T.
- **Enumerar** las posibles limitantes agroproductivas de carácter químico, fisicoquímico y biológico.
- **Identificar** las propiedades que deben analizarse para diagnosticar cada tipo de limitante.

El estudiante deberá revisar las lecturas indicadas en el texto de **Edafología (pp. 448-455)** y consultar las tablas de clasificación actualizadas de FAO/WRB.

#### 3.1 EJERCICIOS DE LA CLASE

El docente asignará un perfil de suelo previamente muestreado y caracterizado para su análisis e interpretación. Los estudiantes, individual o grupalmente, deberán responder y justificar los siguientes puntos:

- **Analice el comportamiento del contenido de arcilla y humus en profundidad.**  
Explique su relación con los procesos de formación del suelo y con la variación del valor T.
- **Determine el tipo de arcilla predominante.**  
Justifique mediante las relaciones moleculares  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  y SAF.
- **Evalúe el valor T y su variación vertical.**  
Interprete la fertilidad potencial y la influencia de la materia orgánica y la mineralogía.
- **Analice la acidez actual y potencial ( $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_3$ ).**  
Determine la presencia de acidez tóxica y discuta su impacto en la productividad.
- **Explique el poder amortiguador del suelo.**  
Fundamente cómo la materia orgánica, el tipo de arcilla y el valor T intervienen en su capacidad de resistir cambios de pH.
- **Identifique la presencia de procesos de lixiviación y lavado.**

Señale los indicios morfológicos y químicos que los evidencian (pérdida de bases, acumulación de Fe o Al).

- **Determine si se manifiestan procesos de salinidad, sodicidad o calcarización.**

Evalúe los resultados de pH, SST, porcentaje de Na y contenido de  $\text{CO}_3^{2-}$ .

- **Analice las relaciones entre cationes cambiables (Ca, Mg, K, Na).**  
Calcule las razones Ca/Mg, K/Mg, K/Ca y evalúe posibles antagonismos o desequilibrios.
- **Enumere las limitantes químicas, fisicoquímicas y biológicas detectadas** a partir de los resultados analíticos del perfil, indicando su nivel de severidad y posibles medidas de manejo.

## Capítulo III: Rehabilitación de Suelos

### 1. Objetivo

Establecer los métodos técnicos y económicamente viables para la rehabilitación de suelos con problemas de acidez, salinidad y sodicidad, definiendo cuándo, cómo, dónde y cuánto material enmendante aplicar, e integrando prácticas hidrotécnicas, físicas y biológicas.

### 2. Requisitos Teóricos Fundamentales

#### 2.1 La acidez del suelo: conceptos clave

La acidez del suelo es uno de los factores más determinantes en la productividad agrícola. Controlada principalmente por el complejo de intercambio (fracción arcillosa y materia orgánica), la acidez influye en la disponibilidad de nutrientes y la salud de las plantas.

pH (acidez activa): El pH mide la concentración de  $\text{H}^+$  en la solución del suelo. Un  $\text{pH} < 5,5$  generalmente indica un riesgo agronómico, debido a la solubilización de  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Mn}^{2+}$ , elementos que pueden ser tóxicos para las plantas.

Acidez potencial (de reserva): La acidez potencial incluye el  $\text{H}^+$  y cationes ácidos ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ) retenidos en el complejo de intercambio del suelo. Esta acidez se evalúa mediante tres fracciones:

- $Y_1$  (acidez hidrolítica): Iones  $\text{H}^+$  fuertemente retenidos.
- $Y_2$  (acidez cambiante):  $\text{H}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{Fe}^{2+}$  intercambiables.

- $Y_3$  (acidez tóxica): Fracción de acidez que representa la toxicidad causada por  $Al^{3+}$  (y, en algunos casos, por  $Mn^{2+}$ ).

#### **Errores frecuentes:**

- Usar solo el pH sin evaluar  $Y_2/Y_3$ .
- Comparar el pH en KCl con pH en  $H_2O$  sin aclarar el extractante.
- No considerar la densidad aparente ( $d_a$ ) y la profundidad ( $h$ ) al calcular la dosis de enmiendas.

### **2.2. Causas principales de la acidez**

- La acidez de los suelos puede ser provocada por varios factores, entre los que destacan:
- Lixiviación intensa en suelos de textura gruesa, que remueve las bases.
- Uso excesivo de fertilizantes amoniacales ácidos, que pueden aumentar la acidez activa.
- Riego mal manejado, lo que contribuye al lavado de bases y favorece la erosión.
- Materiales parentales pobres en bases, como los suelos cuarcíticos.

Los suelos más propensos a la acidez incluyen:

- Suelos ferralíticos (rojos/amarillentos, cuarcíticos).
- Suelos pardo-grisáceos.
- Suelos arenosos cuarcíticos.

### **2.3 Estrategia de manejo en suelos ácidos**

- Eliminar/mitigar causas: Ajustar la fertilización, manejar adecuadamente el riego y controlar la erosión.
- Cultivos tolerantes a la acidez: Utilizar cultivos resistentes cuando  $Y_3$  es baja y la acidez no genera toxicidad.
- Encalado selectivo: En suelos ácidos, el encalado se utiliza principalmente para neutralizar la toxicidad causada por  $Al^{3+}$ .
- Aplicación y mezcla: Aplicar cal en la superficie y mezclarla homogéneamente hasta la profundidad objetivo ( $h$ ). Es necesario respetar el tiempo de reacción (1-2 meses, dependiendo de las lluvias) antes de sembrar.
- Suelos arenosos: Debido a su baja capacidad de amortiguamiento ("buffer"), se recomienda fraccionar la dosis (2-3 aplicaciones) para evitar sobre-encalado.

# REHABILITACIÓN DE SUELOS CON PROBLEMAS DE ACIDEZ

## 1. REQUISITOS TEÓRICOS FUNDAMENTALES

### 1.1 La acidez del suelo: conceptos clave

La acidez del suelo está controlada por el complejo de intercambio (fracción arcillosa y materia orgánica) mediante intercambio iónico y reacciones adsorptivas.

- 1 pH (acidez activa): mide  $H^+$  en la solución del suelo.  $pH < 5,5$  indica riesgo agronómico por solubilización de  $Al^{3+}/Fe^{2+}/Mn^{2+}$ .
- 2 Acidez potencial (de reserva):  $H^+$  y cationes ácidos retenidos en el complejo:
  - $Y_1$  (acidez hidrolítica):  $H^+$  fuertemente retenido (intercambio con  $NaCH_3COO$ ).
  - $Y_2$  (acidez cambiante):  $H^+ + Al^{3+}$  (+  $Fe^{2+}$ ) intercambiables.
  - $Y_3$  (acidez tóxica): fracción de  $Al^{3+}$  (y, según método,  $Mn^{2+}/Fe^{2+}$ ) responsable de toxicidad.

Errores de interpretación frecuentes: usar solo pH sin evaluar  $Y_2/Y_3$ ; comparar pH en KCl con pH en  $H_2O$  sin aclarar extractante; ignorar densidad aparente ( $d_a$ ) y profundidad ( $h$ ) en el cálculo de dosis.

### 1.2 Causas principales de acidez (ejemplos regionales)

- **Lixiviación intensa** en suelos de **textura gruesa** (remoción de bases).
- Uso indiscriminado de **fertilizantes amoniacales ácidos**.
- **Riego mal manejado** (lavado de bases) y **erosión**.
- **Materiales parentales** pobres en bases (cuarcíticos).

**Suelos con mayor propensión:** Ferralíticos (rojos/amarillentos, cuarcíticos), Pardo grisáceos, Arenosos cuarcíticos.

### 1.3 Estrategia de manejo en suelos ácidos

- **Eliminar/mitigar causas** (ajuste de fertilización, manejo de riego, control de erosión).
- **Cultivos tolerantes** a acidez cuando no hay acidez tóxica ( $Y_3$  baja).
- **Encalado selectivo y con objetivo claro:** priorizar **neutralizar  $Y_3$**  (toxicidad por  $Al^{3+}$ ). En ambientes tropicales el objetivo **no** suele ser

llevar el pH a neutralidad, sino **remover toxicidad y mejorar saturación de bases**.

- **Aplicación y mezcla:** aplicar en superficie e **incorporar homogéneamente** hasta la **profundidad objetivo (h)**. Respetar el tiempo de reacción (1–2 meses, según lluvias) antes de la siembra.
- **Suelos arenosos (bajo “buffer”): fraccionar dosis** (2–3 aplicaciones) para evitar **sobre-encalado**.

## 1.4 Efectos del encalado

**En el suelo:**

- Disminuye acidez activa y potencial; insolubiliza  $\text{Al}^{3+}/\text{Mn}^{2+}/\text{Fe}^{2+}$  tóxicos.
- Aumenta  $\text{Ca}^{2+}$  (y según material,  $\text{Mg}^{2+}$ ); coagula arcillas dispersas; mejora estructura, aireación y drenaje.
- Favorece disponibilidad de P (reduce fijación con Al/Fe) y actividad microbiana (humificación/mineralización).
- En las plantas: respuesta específica por cultivo; beneficio general cuando había toxicidad o deficiencia de bases.

**Nota para Cuba y Caribe:** extensas áreas con pH ácido y  $Y_1$  alta, pero  $Y_2/Y_3$  usualmente bajas; por costos, encalar solo ante acidez tóxica ( $Y_3$ ) o saturación de bases críticamente baja.

## 1.5 Materiales encalantes y parámetros de calidad

**Tipos comunes:**

- Sales de ácidos débiles de Ca y Mg:  $\text{CaCO}_3$  (calcita),  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  (dolomita).
- Óxidos/hidróxidos:  $\text{CaO}$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (más reactivos; manejo cuidadoso).

**Parámetros técnicos:**

- Valor neutralizante (VN) o CCE (%  $\text{CaCO}_3$ ): fuerza química relativa al  $\text{CaCO}_3$ .
- Finura o factor de reactividad: % que pasa mallas finas → determina velocidad de reacción.
- ENP (Efectividad Neutralizante del Producto):  $\text{integra VN} \times \text{finura}$ .
- Humedad e impurezas: reducen la dosis efectiva; se corrigen en la dosis física.

**Material tipo:**  $\text{CaCO}_3$  (VN = 100). Dolomita aporta Mg (útil si hay déficit Mg/Ca).

## 1.6 Cálculo del encalado

### *Norma (como CaCO<sub>3</sub> equivalente)*

#### Método 1 (Kapeen) – por Y<sub>1</sub>:

$$N = Y_1 \times 0,05 \times da \times h$$

- **N:** norma de CaCO<sub>3</sub> (t·ha<sup>-1</sup>)
- **Y<sub>1</sub>:** mmol·100 g<sup>-1</sup> ss
- **0,05:** 50 mg CaCO<sub>3</sub> neutralizan 1 mmol H<sup>+</sup>
- **da:** densidad aparente (g·cm<sup>-3</sup>)
- **h:** profundidad de enmienda (cm)

#### Método 2 – por Y<sub>3</sub> (recomendado en trópicos):

$$N = Y_3 \times 0,075 \times da \times h$$

- Se asume 0,075 g CaCO<sub>3</sub> por mmol de Al<sup>3+</sup>.
- **Ventaja:** elimina **acidez tóxica** sin neutralizar toda la Y<sub>1</sub> → **más económico y técnicamente suficiente.**

### *Dosis activa (Da) del material elegido*

Si el material no es CaCO<sub>3</sub>:

$$Da = \frac{N \times 100}{VN}$$

- **VN/CCE:** % equivalente CaCO<sub>3</sub> del material.

### *Dosis física (Df) a aplicar*

Corrige humedad (h%), impurezas (l%) y partículas > 1 mm (K%):

$$Df = \frac{Da \times 100^3}{(100 - h)(100 - l)(100 - K)}$$

- **Df** en t·ha<sup>-1</sup>.

**Recomendaciones operativas:** calibrar esparcidor, aplicar con viento mínimo, **incorporar** (labranza) a la **profundidad objetivo**, y **monitorear pH/Y<sub>3</sub>** a 6–8 semanas.

## 2. EJERCICIO RESUELTO

Datos (campo de 5 ha, profundidad 0–20 cm): Material encalante (ME): VN = 90 %, h% = 10, l% = 20, K% = 5. Suelo:  $Y_1 = 5,5$ ,  $Y_2 = 4,0$ ,  $Y_3 = 2,0$  mmol·100 g<sup>-1</sup>; pH = 4,8; T = 12 mmol·100 g<sup>-1</sup>; da = 1,3 g·cm<sup>-3</sup>.

### 1) Norma (método $Y_3$ ):

$$N = 2,0 \times 0,075 \times 1,3 \times 20 = 3,9 \text{ t} \cdot \text{pha}^{-1} \text{ de CaCO}_3$$

### 2) Dosis activa (Da) con VN = 90 %:

$$Da = \frac{3,9 \times 100}{90} = 4,333 \text{ t} \cdot \text{pha}^{-1}$$

( $\approx 4,33 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ; si se redondea a  $4,30 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ , varía levemente el siguiente paso).

### 3) Dosis física (Df):

**Denominador:**  $(100 - 10)(100 - 20)(100 - 5) = 90 \times 80 \times 95 = 684\,000$

**Numerador:**  $Da \times 100^3 = 4,333 \times 1,000,000 = 4\,333\,333$

$$Df = \frac{4\,333\,333}{684\,000} = 6,335 \text{ t} \cdot \text{pha}^{-1}$$

(Con  $Da = 4,30$ ,  $Df \approx 6,288 \text{ t} \cdot \text{pha}^{-1}$ ).

### 4) Cantidad total para 5 ha:

$$6,335 \times 5 = 31,68 \text{ t de ME}$$

(Usando redondeo previo: **31,44 t**, como en su ejemplo).

**Respuesta técnica:**  $Df \approx 6,33 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  (31,7 t para 5 ha). Diferencias pequeñas dependen del **redondeo** en Da; documente la cifra usada.

## 3. EJERCICIOS PARA LA PREPARACIÓN PREVIA DEL ESTUDIANTE

- Diferencie **pH**,  **$Y_1$** ,  **$Y_2$** ,  **$Y_3$**  (definición, método y significado agronómico).
- ¿En qué consiste el **encalado** y cuáles son sus objetivos en trópico?
- ¿Cuándo se **justifica** encalar en condiciones tropicales? (criterios por  **$Y_3$** , **V%**, **cultivo**).
- Defina y diferencie **norma**, **dosis activa (Da)**, **valor neutralizante (VN/CCE)** y **dosis física (Df)**.

### 3.1 EJERCICIOS PROPUESTOS

#### Ejercicio 1

Datos de acidez para 4 suelos:

| SUELO | PH  | Y <sub>1</sub> | Y <sub>2</sub> | Y <sub>3</sub> |
|-------|-----|----------------|----------------|----------------|
| 1     | 5,6 | 2,1            | 1,2            | –              |
| 2     | 4,0 | 4,2            | 2,1            | 1,2            |
| 3     | 4,5 | 4,0            | 2,0            | –              |
| 4     | 4,0 | 4,3            | 2,5            | 0,5            |

#### Preguntas:

- ¿En cuáles se debe encalar, con qué prioridad y por qué? (pH, Y<sub>2</sub>/Y<sub>3</sub>)
- ¿Cómo realizar el encalado? (método de cálculo, material idóneo, fraccionamiento, incorporación y verificación).

#### Ejercicio 2

**Contexto:** Suelo Ferralítico amarillento lixiviado, 7 ha.

**Resultados del suelo:** pH (KCl) = 4,3; Y<sub>1</sub> = 5,3, Y<sub>2</sub> = 4,1, Y<sub>3</sub> = 3,1 (mmol·100 g<sup>-1</sup>); da = 1,2 g·cm<sup>-3</sup>; h = 30 cm.

**Material encalante:** VN = 85 %; Impurezas = 10 %; Partículas < 1 mm = 95 %; Humedad = 10 %.

#### Tareas:

- Calcule la norma por Y<sub>1</sub> y por Y<sub>3</sub>. Compare y argumente técnica y económicamente cuál conviene.
- Con el método seleccionado, calcule Da, Df y la cantidad total para 7 ha.

#### Ejercicio 3

**Suelo Ferralítico amarillento:** Y<sub>1</sub> = 3,9; Y<sub>2</sub> = 2,5; Y<sub>3</sub> = 1,8 (mmol·100 g<sup>-1</sup>); T = 18; pH = 4,2; da = 1,21 g·cm<sup>-3</sup>; h = 20 cm.

**Material encalante:** VN = 120 %; Humedad = 10 %; Impurezas = 20 %; Partículas > 1 mm = 5 %.

**Tarea:** Calcule N (Y<sub>3</sub>), Da y Df.

#### Ejercicio 4 (análisis económico)

La norma requerida (como  $\text{CaCO}_3$ ) es  $3 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Se dispone de:

| MATERIAL | DOSIS ACTIVA ( $\text{T} \cdot \text{HA}^{-1}$ ) | DOSIS FÍSICA ( $\text{T} \cdot \text{HA}^{-1}$ ) | COSTO (USD/T) | COSTO POR HA (USD) |
|----------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------|--------------------|
| A        | 5,0                                              | 7,4                                              | 32,0          | 236,8              |
| B        | 8,9                                              | 10,2                                             | 28,0          | 285,6              |
| C        | 4,2                                              | 5,6                                              | 40,0          | 224,0              |

**Tarea:** Elija el material **más económico** considerando **Df**. Justifique (costo total, logística, reactividad).

Notas operativas y de control (sugeridas para el docente)

- Verificar pH ( $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{KCl}$ ),  $\text{Y}_2/\text{Y}_3$  y  $\text{V}\%$  antes y 6–8 semanas después del encalado.
- Priorizar materiales con VN conocido y finura certificada (ENP alto).
- En siembras próximas: fraccionar dosis o usar materiales más reactivos (hidróxidos) con cuidado de manejo.
- Documentar coordenadas, fecha, lote, profundidad de incorporación, equipo utilizado y condiciones de humedad.

## Capítulo III: Rehabilitación de Suelos con Problemas de Salinidad y Sódicidad

### 1. Objetivo

Establecer vías técnicas y económicamente viables para la rehabilitación de suelos salinos, salino-sódicos y sódicos, definiendo cuándo, cómo, dónde y cuánto material enmendante aplicar, e integrando prácticas hidrotécnicas, físicas y biológicas.

### 2. Requisitos Teóricos Fundamentales

#### 2.1 Conceptos y métricas clave

1 **Salinidad:** El exceso de **sales neutras solubles** en la zona radical.

- Indicadores:

- **ECE (conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada):** Medición de la **concentración de sales** solubles en el suelo.
  - Iones mayoritarios ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ); relación con la **EC del agua de riego (ECw)**.
2. **Sodicidad:** El exceso de  **$\text{Na}^+$  intercambiable** en el complejo de intercambio, lo que **dispersa arcillas y degrada la estructura del suelo**.
- Indicadores:
    - **ESP (sodio intercambiable):** % de  **$\text{Na}^+$  intercambiable** en el complejo de intercambio.
    - **SAR (Sodium Adsorption Ratio):** Relación entre el  **$\text{Na}^+$**  y el  **$\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$**  en solución.
    - **pH:** Los suelos **sódicos** son típicamente **alcalinos** ( $\approx 8,2-10$ ) debido a la presencia de **hidróxidos/carbonatos**.
3. **Diagnóstico morfológico de campo:**
- **Costras salinas/blancas**, estructura pulverulenta o masiva, sellado superficial, infiltración lenta, vegetación halófito, manchas de sodicidad, estructuras prismáticas/columnar, grietas.

## 2.2 Umbrales analíticos de referencia (clasificación operativa)

| CLASE                | ECE<br>( $\text{DS}\cdot\text{M}^{-1}$ ) | ESP<br>(%) | SAR       | PH<br>( $\text{H}_2\text{O}$ ) | RASGOS<br>DOMINANTES                   |
|----------------------|------------------------------------------|------------|-----------|--------------------------------|----------------------------------------|
| <b>SALINO</b>        | > 4                                      | < 15       | < 13      | 7,5–8,5                        | Alta osmoticidad, estructura estable   |
| <b>SALINO-SÓDICO</b> | > 4                                      | $\geq 15$  | $\geq 13$ | $\sim 8,5$                     | Sales + Na intercambiable, riesgo alto |
| <b>SÓDICO</b>        | $\leq 4$                                 | $\geq 15$  | $\geq 13$ | 8,5–10                         | Dispersión, baja infiltración, costras |

**Nota:** En la clasificación histórica nacional (Cuba, 1988) se usaban SST%, Na%T y pH. Actualmente, ECE–ESP–SAR brindan un diagnóstico más directo y útil para el manejo.

## 2.3 Génesis y causas frecuentes

- Aguas de riego salinas con ECw alta y/o RAS alta y un balance hídrico con evaporación mayor a precipitación, lo que causa acumulación capilar.
- Drenaje deficiente (freático somero salino; ascenso capilar).
- Manejo inadecuado: sobreriego sin drenajes, compactación, rotaciones sin cobertura, y deforestación (pérdida de control evapotranspirativo).

## 2.4 Estrategias de recuperación: visión integrada

- **Suelos salinos: Lavado controlado** (leaching) + drenaje funcional, manejo del riego y coberturas.
- **Suelos salino-sódicos: Enmienda cálcica** ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) para desplazar  $\text{Na}^+$ , seguida de lavado y drenaje.
- **Suelos sódicos: Aportar  $\text{Ca}^{2+}$  soluble** (yeso/ácidos formadores) para **flocular arcillas** y restaurar la estructura; luego lavado. Son los más difíciles de manejar.

## 3. Métodos de Recuperación

### A) Métodos físicos (soporte estructural)

- **Subsileo:** Rompimiento de capas densas y aumento de la **Ksat** (efecto 1 ciclo si no se corrigen causas).
- **Labranza profunda:** Puede movilizar  **$\text{CaCO}_3$ /yeso** de profundidad; mejora infiltración y enraizamiento.
- **Inversión de perfil:** Solo en casos puntuales (alto costo).
- **Sellos/impermeabilizantes en canales:** Para cortar retornos salinos.

**Objetivo:** Facilitar el lavado y la incorporación homogénea de enmiendas, especialmente en suelos **sódicos**, donde la **dispersión** es un desafío crítico.

### B) Métodos químicos (mejoradores/correctores)

- **Principio:** Aportar  **$\text{Ca}^{2+}$  soluble** para reemplazar  **$\text{Na}^+$**  en sitios de intercambio y estabilizar agregados; luego extraer  **$\text{Na}^+$**  con lavado.
- **Materiales frecuentes:**
  - **Yeso agrícola** ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ): Económico, baja solubilidad → requiere finura y mezcla adecuada.
  - **Cloruro de calcio** ( $\text{CaCl}_2$ ): Muy soluble y eficaz; costoso y sensible al cloruro.

- **Ácidos / formadores de ácido:** El **azufre elemental** ( $S^0$ ) se convierte en  $H_2SO_4$  mediante oxidación microbiana → forma **yeso in situ**.
- **Selección del mejorador:**
  - Si  $CaCO_3 \geq 1\%$  y  $pH > 7,5$ : Usar  $S^0$  o  $H_2SO_4$  para generar yeso in situ o aplicar **yeso directo**.
  - Sin  $CaCO_3$  y  $pH > 7,5$ : Preferir **sales cálcicas** (yeso/ $CaCl_2$ ).
  - **Criterio económico:** Evaluar **costo por kg de  $Ca^{2+}$**  utilizable, considerando **VN/CCE** y **ENP**.
- **Advertencias:**
  - Los mejoradores no eliminan la **causa** (agua salina, mal drenaje); solo corrigen efectos.
  - Requieren **drenaje operativo**; sin salida, el  $Na^+$  desplazado y las sales se re-acumulan.

### C) Métodos hidrotécnicos (indispensables)

- **Drenaje:** Zanja o subsuperficial para bajar el nivel freático y evacuar sales.
- **Lavado (leaching):** Aplicar láminas de agua para reducir **ECe** en la zona radical (0–30/60 cm).
- **Lavado profiláctico:** Previo a cultivo o en barbecho en suelos muy salinos.
- **Lavado de control:** Aportar fracción de lixiviación en cada riego (**LR**).

**Fórmula práctica de la fracción de lavado (LR):**

$$LR \approx \frac{ECw}{5 \times ECe - ECw}$$

(Usar con criterio;  $ECw < 5 \cdot ECe$ ).

### D) Métodos biológicos (apoyo y pos-recuperación)

- **Coberturas y materia orgánica:** Mejoran **porosidad** y **Ksat**, reducen **evaporación** y el flujo capilar ascendente.
- **Aporte de residuos:** Favorecen disolución de  $CaCO_3$  y agregación.
- **Rotaciones tolerantes** durante la transición.

### 3.1 Cálculos Prácticos

#### **Requerimiento de yeso (GR) para reducir sodicidad**

Objetivo: Bajar **ESP** desde **ESP<sub>o</sub>** a **ESP<sub>f</sub>** en un espesor **h** (cm), con **da** (g·cm<sup>-3</sup>) y **CEC** (cmolc·kg<sup>-1</sup>).

**Fórmula operativa (aprox.):**

$$GR(t \cdot ha^{-1}) \approx 0,86 \times CEC \times (ESP_0 - ESP_f) \times da \times h$$

**Ajuste por calidad del producto (ENP):**

$$\text{Dosis activa (Da)} = \frac{GR \times 100}{ENP}$$

Dosis física (Df), corrigiendo humedad (H%), impurezas (I%) y partículas > 1 mm (K%):

$$Df = \frac{Da \times 100^3}{(100 - H)(100 - I)(100 - K)}$$

## 4. Ejercicios Propuestos

### **Ejercicio 1: Priorización de intervención**

- Clasifique los suelos como salino, salino-sódico o sódico.
- Determine el orden de prioridad de intervención y la estrategia (enmienda, lavado, drenaje).
- Analice los riesgos de re-salinización y cómo mitigarlos.

### **Ejercicio 2: Cálculo de LR**

- Un cultivo tolera  $ECe = 6 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1*}$ ;  $ECw = 1,2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ . Calcule LR y estime la fracción adicional de lixiviación para un riego de 6000 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>/ciclo.

### **Ejercicio 3: Requerimiento de yeso**

- Con  $CEC = 12 \text{ cmolc} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $ESP_0 = 22 \%$ ,  $ESP_f = 10 \%$ , y  $da = 1,30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , calcule el GR, Da y Df.

### **Ejercicio 4: Selección económica**

- Tres materiales con ENP = 90 %, 75 % y 70 %. Compare el costo de cada uno y seleccione el material más adecuado.

### **Notas Finales para el Docente**

- Monitoreo post-rehabilitación: Re-muestreo de ECe, ESP, SAR, pH y Ksat 6–8 semanas después de la intervención.
- Aplicación controlada de enmiendas: Utilizar yeso o sales cálcicas en dosis fraccionadas en suelos sódicos.
- Revisión periódica de drenaje: Asegurarse de que el agua se evacue correctamente.

## 5. Metodología para determinar la cantidad de mejorador a aplicar en un suelo con problemas de sodicidad.

Calcular la dosis activa (o norma) y la dosis física de yeso a aplicar a 1 ha de un suelo salino-sódico, del cual se desea mejorar los primeros 30 cm de profundidad.

Las características del suelo son las siguientes:

Valor T = 30 mmol.  $100^{-1}$  g ss

**NOTA:** el sodio permisible será siempre el **10 % del valor T**

**Na<sup>+</sup>Intercabable = 6 mmol . $100^{-1}$  g ss da = 1,3 g.  $\text{cm}^{-3}$**

**pH =8**

La dosis activa se calcula por el método de Margulis (se calcula para el  $\text{CaSO}_4$ ), según la fórmula:

**Da= 0,086 (Na<sup>+</sup>int – Na<sup>+</sup>perm) h. da**

**Donde:**

**Da = Dosis activa (es la cantidad de yeso puro en t.  $\text{ha}^{-1}$ ) 0,086 = es la masa de 1 mmol de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$**

**Na<sup>+</sup>int = Na<sup>+</sup> intercambiable. Na<sup>+</sup>perm = Na<sup>+</sup> permisible**

**Na<sup>+</sup>int / Na<sup>+</sup>perm = Na<sup>+</sup> a desplazar h = profundidad (cm)**

**da = densidad aparente**

**30 mmol. 100 g – 1 ssX Na + permisible**

**= -----**  
**-----**

**100%10 %**

$$X = 3 \text{ mmol} \cdot 100^{-1} \text{ g ss Da} = 0,086 (6 - 3) 30. 1,3 = 10,06 \text{ t. ha}^{-1} \\ \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$$

Ésta es la cantidad de yeso requerida para realizar la mejora del área con que se cuenta (1 ha) considerando una pureza de 100 % del material. Cuando el material mejorador fuese diferente al yeso, se multiplica esta norma o dosis activa por un factor de conversión, que no es más que la masa de 1 mmol de la sustancia que se emplea como mejorador, referida al  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Equivalente del yeso con otros mejoradores (para un 100% de pureza)

Yeso = 1

*CaCl*2 = 0,85

*Caliza* = 0,58

*Azufre* = 0,19

*H*2*S*O4 = 0,57

Ejemplo:

Norma de azufre =  $10,06 \text{ t. ha} - 1 \text{ CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \cdot 0,19 = 1,91 \text{ t. ha} - 1 \text{ de Azufre.}$

La dosis física se calculará de igual forma que para los materiales encalantes.

**Nota:** Este método no considera la recuperación del suelo por el yeso presente en la capa de suelo a mejorar.

## 5.1 ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE LOS MÉTODOS QUÍMICOS:

- a.- Se aplican solamente a suelos con problemas de sodio intercambiable, siendo su propósito eliminar el  $\text{Na}^+$  al favorecer su lavado y con ello mejorar las condiciones físicas y evitar los efectos tóxicos del sodio en la nutrición vegetal.
- b.- Los mejoradores no atacan la causa u origen del problema, sino sus efectos.
- c.- No pueden esperarse resultados inmediatos, principalmente cuando se utiliza yeso o azufre.
- d.- Para asegurar una más rápida y eficiente recuperación, se recomienda el auxilio de otros métodos y/o prácticas.

e.- Recordar siempre que el problema que se está resolviendo tiene un origen y que la gran mayoría de las veces este problema está localizado en un área, siendo el resultado de las áreas vecinas, no siendo suficiente atacar y resolver los efectos de las parcelas aisladas, sino las causas de toda el área.

## **6. Metodología a seguir en la recuperación de suelos salinos:**

### **6.1 Recuperación de suelos salinos:**

Lo único que se requiere es agua para solubilizar y transportar las sales a las profundidades del perfil, fuera de la zona radical, con el auxilio del drenaje natural y/ o artificial. Los pasos a seguir son:

- Eliminar o controlar las causas: se eliminan las causas antropogénicas y para las naturales se debe reducir la evaporación mediante cultivos de cobertura (cuando se puedan establecer) o una labranza que rompa la franja de capilares.
- Mejorar el drenaje interno si fuese necesario (con métodos físicos y/o biológicos)
- Aplicar lavados profilácticos y de control. (efectuar control a la calidad del agua).
- Cultivar especies y variedades tolerantes.

### **6.2 Recuperación de suelos salinos-sódicos:**

- Controlar las causas.
- Mejorar el drenaje (uso de medidas físicas y biológicas).
- Aplicar mejoradores (Enyesado o azufrado, según las condiciones).
- Lavados profilácticos y de control.
- Cultivar especies tolerantes.

### **6.3 Recuperación de suelos sódicos:**

- Controlar las causas
- Mejorar el drenaje y la estructura del suelo con todos los métodos posibles: físicos, biológicos y químicos — hidrotécnicos.
- Aplicar mejoradores (Enyesado o azufrado).
- Lavados profilácticos y de control (posible uso de aguas mineralizadas que no sean ricas en Na).

- Cultivar especies tolerantes (más importante que en los salinos-sódicos).

## 7. PREPARACIÓN PREVIA DEL ESTUDIANTE:

Contestar las siguientes preguntas:

- En qué consiste la clasificación de los suelos salinos.
- Objetivos con que se realiza la labranza profunda y el subsoleo en la mejora de los suelos salinos.
- Tipos de mejoradores químicos que se pueden emplear para eliminar la sodicidad. ¿Qué objetivos se persiguen con los mismos?
- Criterios que se siguen para la selección de un mejorador químico.
- Diferenciar los lavados profilácticos y de control en la mejora de los suelos salinos

### 7.1 EJERCICIOS PROPUESTOS:

#### EJERCICIO 1:

a - Atendiendo a la clasificación de los suelos salinos, clasifique los suelos correspondientes a los perfiles 1 a, 1 b, II y III.

b.- Tomando en consideración las características generales de estos suelos, infiera las causas que han originado la presencia de sales en cada uno.

c.- Establezca para cada suelo la secuencia de métodos de mejoramiento necesarios para la recuperación de los suelos.

#### Características de los suelos.

| Suelo I a |     |                                                  |                  |                 |           |          |
|-----------|-----|--------------------------------------------------|------------------|-----------------|-----------|----------|
| Prof. cm. | pH  | Cationes cambiabiles (mmol. 100 <sup>-1</sup> g) |                  |                 | Na/T<br>% | SST<br>% |
|           |     | Ca <sup>2+</sup>                                 | Mg <sup>2+</sup> | Na <sup>+</sup> |           |          |
| 0 — 20    | 7.8 | 1.85                                             | 3.01             | 10.16           | 5.4       | 1.08     |
| 20 - 40   | 7.4 | 3.84                                             | 2.02             | 20.08           | 8.2       | 1.46     |
| 40 -60    | 7.6 | 2.38                                             | 1.65             | 16.48           | 8.0       | 1.22     |
| 60 - 80   | 7.8 | 3.24                                             | 2.06             | 22.34           | 10.1      | 1.96     |
| 80 -100   | 7.9 | 0.92                                             | 1.44             | 10.16           | 6.4       | 1.96     |

**Suelo I a:** Manto freático alto y drenaje deficiente.

| Suelo I b |     |                                                 |                  |                 |           |          |
|-----------|-----|-------------------------------------------------|------------------|-----------------|-----------|----------|
| Prof. cm. | pH  | Cationes cambiabiles (mmol.100 <sup>-1</sup> g) |                  |                 | Na/T<br>% | SST<br>% |
|           |     | Ca <sup>2+</sup>                                | Mg <sup>2+</sup> | Na <sup>+</sup> |           |          |
| 0 — 20    | 7.9 | 16.0                                            | 8.03             | 28.77           | 11.00     | 1.612    |
| 20 - 40   | 8.1 | 5.6                                             | 3.82             | 19.73           | 13.00     | 1.281    |
| 40 -60    | 8.1 | 6.5                                             | 3.86             | 18.86           | 14.20     | 1.007    |
| 60 - 80   | 8.1 | 1.35                                            | 1.17             | 13.64           | 13.00     | 0.813    |
| 80 -100   | 8.1 | 0.50                                            | 0.45             | 11.21           | 12.00     | 0.693    |

**Suelo I b:** Manto freático bajo, drenaje regular y con CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> incrementándose en profundidad.

| Suelo II  |     |                                                     |                  |                 |           |          |
|-----------|-----|-----------------------------------------------------|------------------|-----------------|-----------|----------|
| Prof. cm. | pH  | Cationes cambiabiles (mmol.<br>100 <sup>-1</sup> g) |                  |                 | Na/T<br>% | SST<br>% |
|           |     | Ca <sup>2+</sup>                                    | Mg <sup>2+</sup> | Na <sup>+</sup> |           |          |
| 0 - 20    | 8.6 | 8.08                                                | 8.90             | 20.00           | 23.0      | 1.28     |
| 20 - 40   | 8.0 | 7.50                                                | 8.90             | 27.00           | 22.0      | 1.06     |
| 40 -60    | 8.2 | 8.58                                                | 8.90             | 25.00           | 24.0      | 1.75     |
| 60 - 80   | 8.3 | 7.00                                                | 7.97             | 28.00           | 25.0      | 1.90     |
| 80 -100   | 8.4 | 6.00                                                | 7.24             | 27.00           | 23.0      | 1.75     |
| 100 - 120 | 8.5 | 4.95                                                | 6.61             | 31.00           | 20.0      | 1.82     |

**Suelo II:** Manto freático alto, drenaje deficiente y sin  $\text{CO}_3^{2-}$

| Suelo III |     |                                                  |                  |                 |           |          |
|-----------|-----|--------------------------------------------------|------------------|-----------------|-----------|----------|
| Prof. cm. | pH  | Cationes cambiabiles (mmol. 100 <sup>-1</sup> g) |                  |                 | Na/T<br>% | SST<br>% |
|           |     | Ca <sup>2+</sup>                                 | Mg <sup>2+</sup> | Na <sup>+</sup> |           |          |
| 0 - 20    | 8.0 | 9.43                                             | 2.31             | 11.09           | 20.0      | 1.57     |
| 20 - 40   | 8.1 | 4.50                                             | 1.65             | 12.87           | 19.0      | 1.02     |
| 40 - 60   | 8.2 | 11.50                                            | 4.23             | 15.40           | 21.0      | 1.46     |
| 60 - 80   | 8.0 | 13.50                                            | 5.68             | 18.79           | 24.0      | 1.52     |
| 80 - 100  | 8.0 | 5.00                                             | 2.69             | 16.66           | 23.0      | 1.24     |
| 100 - 120 | 8.1 | 2.20                                             | 1.46             | 14.87           | 21.0      | 1.06     |

**Suelo III:** Manto freático alto, drenaje deficiente y con  $\text{CO}_3^{2-}$  a partir de los 20 cm de profundidad.

**EJERCICIO 2:**

Se conoce para un suelo los siguientes datos:

$$pH = 9.5 \quad T = 40 \text{ mmol. } 100 - 1g \text{ ss}$$

$$Y1 = 0 \text{ mmol. } 100 - 1g \text{ ssNa} + \text{int.} = 10 \text{ mmol. } 100 - 1g \text{ ss} \quad Y2 = 0 \text{ da} = 1,2 \text{ g.cm} - 3$$

$$Y3 = 0 \text{ mmol. } 100 - 1g \text{ ssSST} = 1,7 \%$$

**Responda las siguientes preguntas:**

- ¿Qué problema presenta este suelo?
- Establezca en una secuencia lógica las medidas que Ud. recomienda ejecutar en la rehabilitación de este suelo, justificando la acción que realiza cada una de ellas.

### EJERCICIO 3:

Se determinaron en un suelo los siguientes datos analíticos:

| Profundidad | pH<br>KCl | %<br>SST | Na <sup>+</sup><br>Intercamb. | Valor<br>T | %<br>CO <sub>3</sub> | da<br>g/cm <sup>3</sup> |
|-------------|-----------|----------|-------------------------------|------------|----------------------|-------------------------|
| 0 – 20      | 8,8       | 1,2      | 9,4                           | 46,8       | 5,4                  | 0,9                     |
| 20 – 80     | 7,7       | 0,6      | 5,2                           | 39,7       | 5,6                  | 1,05                    |
| 80 – 120    | 7,6       | 0,4      | 4,1                           | 37,2       | 8,2                  | 1,1                     |

#### Conteste:

- ¿Qué limitante agroproductiva presenta el mismo? Justifique cada una y diga su posible causa.
- Clasifique el suelo según la clasificación estudiada para los suelos salinos.
- ¿Justifique que material enmendante selecciona de los presentes en almacén para utilizar en su rehabilitación?
- Establezca en una secuencia lógica las medidas que usted recomienda realizar de manera integrada en la rehabilitación de este suelo, justificando la acción esperada de las mismas.
- Calcule la dosis a aplicar de mejorador en caso de que fuera necesaria esta medida durante la recuperación del suelo.

**Materiales enmendantes en el almacén:**  $CaCO_3$ ,  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  y  $S_8$

# **CAPÍTULO I: PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA DETERMINACIÓN E INTERPRETACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE, DENSIDAD REAL Y POROSIDAD TOTAL DEL SUELO**

## **1. OBJETIVO**

Determinar las densidades aparentes ( $d_a$ ) y real ( $D_r$ ) del suelo para calcular la porosidad total ( $P_t$ ) e interpretar su significado agronómico, enfatizando los principios de medición y el diagnóstico de la limitante compactación.

## **2. INTRODUCCIÓN**

La **densidad real ( $D_r$ )** expresa la **masa de la fracción sólida** por unidad de volumen de sólidos (minerales + materia orgánica), sin poros. Depende de la **mineralogía** (cuarzo, feldespatos, arcillas, óxidos de Fe y Al, minerales pesados) y del **contenido de materia orgánica (MO)**.

La **densidad aparente ( $d_a$ )** es la **masa de suelo seco en horno** por unidad de **volumen total in situ**, incluyendo el espacio poroso; por tanto, se relaciona inversamente con la **porosidad total ( $P_t$ )** y depende de **textura, estructura, contenido de MO, estado de compactación, profundidad y manejo**.

La **porosidad total ( $P_t$ )** es la fracción del volumen de suelo **no ocupado por sólidos** (rellenado por aire y/o agua). Una **distribución adecuada de macro- y microporos** es clave para aireación, infiltración, retención de agua y crecimiento radicular.

### **1.1 ORIENTACIONES DE LABORATORIO (fuente de apoyo)**

Manual de actividades prácticas de suelo (Nelson J. Martín y Ramón Cabrera):

- Densidad aparente: pp. 225–229
- Densidad real: pp. 229–232
- Porosidad total: pp. 232–233

### 3. DESARROLLO

#### 3.1 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD REAL ( $D_r$ ) — MÉTODO DEL PICNÓMETRO

**Principio:** se determina la **masa seca** de una alícuota de suelo y el **volumen desplazado** por esa masa mediante un **picnómetro** con agua destilada.  $D_r$  = masa de sólidos / volumen de sólidos.

##### *Equipo y materiales*

- Picnómetro calibrado (con tapa capilar).
- Balanza (0,001 g).
- Placa calefactora o baño María.
- Horno ( $105 \pm 2$  °C).
- Agua destilada, desecador, espátulas.

##### *Muestras*

- Suelo secado al aire, tamizado a  $< 2$  mm.
- Determinar humedad higroscópica ( $H_y$ , %) en subsample para corregir masa.
- Variables y pesadas (definiciones)
- $C$  = masa del picnómetro vacío y seco (g).
- $A$  = masa del picnómetro + agua destilada enrasado a  $T$  de trabajo (g).
- $m_a$  = masa de suelo al aire pesada ( $\approx 20$  g).
- $H_y$  = humedad higroscópica (%) del suelo al aire.
- $m$  = masa de suelo seca en horno correspondiente a  $m_a$ :

$$m = m_a \times \frac{100 - H_y}{100}$$

- $B$  = masa del picnómetro + suelo + agua enrasada después de hervir/desairear y enfriar a  $T$  (g).

##### *Procedimiento resumido*

- Pesar **C**.
- Llenar y enrasar el picnómetro con agua: pesar **A**.
- Pesar  **$m_a \approx 20$  g** de suelo ( $< 2$  mm). Determinar  **$H_y$**  (submuestra a 105 °C). Calcular  **$m$**  (masa seca).
- Introducir el suelo en el picnómetro, añadir agua hasta  $\sim \frac{1}{2}$ , **hervir 30 min** (o baño ultrasónico) para **eliminar aire**, enfriar a  $T$ , **enrasar** y pesar **B**.

- Repetir una vez (control de repetibilidad  $\leq 0,01$  g en B).
- **Cálculo del volumen de sólidos ( $V_s$ )**  
El volumen de sólidos equivale al **volumen de agua desplazada**:

$$V_s = \frac{(A - B) + m}{\rho_w}$$

donde  $\rho_w$  es la densidad del agua a la temperatura de trabajo ( $\approx 0,998$ – $0,999$  g·cm<sup>-3</sup> entre 20–25 °C). Si no corrige temperatura, use 1,000 g·cm<sup>-3</sup> como aproximación y consigne la T.

#### **Cálculo de la densidad real**

$$D_r = \frac{m}{V_s} \text{ (g} \cdot \text{cm}^{-3}\text{)}$$

**Nota sobre “coeficiente de higroscopicidad (chig)”**: equivale a la corrección por humedad higroscópica para expresar m en base seca en horno. La corrección usada arriba con  $H_y$  cumple esa función y es preferible expresarla explícitamente.

#### **Controles de calidad**

- Eliminar totalmente burbujas (hervido/ultrasonido).
- Registrar temperatura (corrección de  $\rho_w$ ).
- Repetir determinación ( $CV \leq 1$  %).
- No usar suelos con yesos solubles sin precaución (posibles errores por disolución).

### **3.2 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE ( $d_a$ ) — MÉTODO DEL CILINDRO CORTANTE**

**Principio**: se extrae un **cilindro de volumen conocido** del suelo **in situ** conservando su estructura; se seca en horno y se calcula  $d_a$  = masa seca / volumen total.

#### **Equipo y materiales**

- Cilindros (p. ej., **100 cm<sup>3</sup>**; medir **diámetro interno y altura** con pie de rey).
- Martillo de inserción + protector, espátulas, reglas.
- Horno ( $105 \pm 2$  °C), desecador, balanza (0,01 g).

#### **Muestreo y precauciones**

- Sitios **representativos**, alejados de caminos/huellas/edificaciones.

- **Condición de tempero** (evitar extremos secos/húmedo).
- **Evitar vibraciones** y compresión adicional al insertar.
- **Replicación:**  $\geq 3$  por horizonte o profundidad de interés.
- **Procedimiento resumido**
- Medir **diámetro (d)** y **altura (h)** del cilindro (cm).
- Insertar cuidadosamente hasta ras. Cortar excedentes al ras superior e inferior.
- Tapar extremos para transporte; pesar **m húmeda** si se desea.
- Secar en horno a **105 °C** hasta **masa constante**; enfriar en desecador; pesar **m seca**.
- Calcular **Volumen geométrico del cilindro:**

$$V = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 h (\text{cm}^3)$$

- Calcular **densidad aparente:**

$$d_a = \frac{m_{\text{seca}}}{V} (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$$

- **Controles de calidad**
- Revisar **da** fuera de rango (p. ej.,  $> 2,0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  en suelos minerales)  $\rightarrow$  posible **error de volumen o secado**.
- Registrar **humedad gravimétrica** (útil para interpretar variabilidad).

### **CÁLCULO DE LA POROSIDAD TOTAL ( $P_t$ )**

$$P_t = \left(1 - \frac{d_a}{D_r}\right) \times 100 (\%)$$

- Si **Dr** no se determina, puede asumirse **Dr  $\approx 2,65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$**  para suelos minerales **sin** MO elevada **ni** minerales pesados. Documentar la suposición.

## **3.3 INTERPRETACIÓN TÉCNICA**

### **Rangos típicos**

- Densidad real ( $D_r$ )
  - Suelos minerales “típicos”:  $\approx 2,65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .
  - Con MO alta (horizonte A): pueden verse  $2,40\text{--}2,60 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

- Con minerales pesados (magnetita, granates, zircón, hematita):  $> 2,75 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .
- Densidad aparente (da)
  - Texturas arcillosas con buena estructura:  $0,90\text{--}1,20 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .
  - Franco-limosas:  $1,20\text{--}1,40 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .
  - Arenosas:  $1,40\text{--}1,60 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  (porosidad natural menor).
- Porosidad total (Pt)
  - Suelos agrícolas bien estructurados: 45–60 %.
  - Para un desempeño agronómico equilibrado, se recomienda  $\approx 1/3$  macroporos (aireación/drenaje) y  $2/3$  microporos (retención).

### 3.4 Diagnóstico de compactación (criterios prácticos)

- Umbrales críticos (aprox.) donde el crecimiento radicular y la aireación se comprometen:
  - Arcillosos:  $da \geq 1,40\text{--}1,60 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .
  - Franco-limosos:  $da \geq 1,55\text{--}1,65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .
  - Arenosos:  $da \geq 1,65\text{--}1,75 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .
- Señales asociadas: Pt baja ( $\leq 40\text{--}45 \%$ ), resistencia a la penetración alta, encharcamiento superficial, raíces superficiales/deformadas, caída de infiltración.

**TABLA DE CLASIFICACIÓN (REFERENCIAL)**

| PROPIEDAD                               | MUY BAJA | BAJA                | MEDIA               | ALTA                | MUY ALTA |
|-----------------------------------------|----------|---------------------|---------------------|---------------------|----------|
| DR<br>( $\text{G}\cdot\text{CM}^{-3}$ ) | —        | $< 2,40$            | $2,41\text{--}2,60$ | $2,61\text{--}2,80$ | $> 2,80$ |
| DA<br>( $\text{G}\cdot\text{CM}^{-3}$ ) | $< 1,00$ | $1,00\text{--}1,20$ | $1,21\text{--}1,45$ | $1,46\text{--}1,60$ | $> 1,60$ |
| PT (%)                                  | $< 40$   | $41\text{--}45$     | $46\text{--}55$     | $56\text{--}65$     | $> 65$   |

**Notas:** Pt **baja** con da **alta** y/o Dr **normal** sugiere **compactación** o **pobre estructura**; Pt **muy alta** con da **muy baja** puede indicar **suelo orgánico** o estructura extremadamente laxa (riesgo de colapso bajo carga).

### COMPROBACIÓN DE LA ASIMILACIÓN (CUESTIONARIO)

- Diferencie **densidad real** y **densidad aparente** (definición, unidad, qué volumen consideran).

- ¿De qué **factores** dependen **Dr** y **da**? Ejemplifique con textura, MO y compactación.
- Al **compactarse** el suelo, ¿qué ocurre con **Dr**, **da** y **Pt**? Explique el mecanismo.
- Indique la **fórmula** para calcular **Pt** y sus **unidades**.
- A partir de  $P_t = (1 - \frac{d_a}{D_r})100$ , explique la relación **inversa** entre **da** y **Pt**, y el efecto de **Dr** sobre el resultado.
- ¿Con qué **umbrales** de **da** y **Pt** consideraría la **compactación** como limitante agroproductiva según la textura?

### INFORME FINAL (ESQUEMA SUGERIDO)

- 1. Identificación de la muestra:** sitio, coordenadas, profundidad, horizonte, fecha, condición hídrica.
- 2. Métodos:** Dr por picnómetro; da por cilindro cortante; cálculo de Pt.
- 3. Datos originales:** masas (A, B, C, m<sub>a</sub>, Hy, m), dimensiones del cilindro (d, h), temperaturas, réplicas.
- 4. Cálculos:** Dr, da, Pt (mostrar ecuaciones y sustitución numérica).
- 5. Resultados y estadísticos:** promedio, desviación estándar, CV.
- 6. Interpretación:** clasificación (tabla), diagnóstico de compactación, implicaciones en aireación, infiltración y crecimiento radicular.
- 7. Recomendaciones:** manejo (tráfico controlado, contenidos de MO, subsileo selectivo, rotaciones con raíces pivotantes, ventanas de laboreo en tempero).

### NOTAS OPERATIVAS Y DE CONTROL

- Base seca en horno (105 °C) obligatoria para masas (m, m<sub>seca</sub>).
- Registrar temperatura para  $\rho_w$  (picnómetro) y nivel de burbujeo.
- En suelos con yeso/sales, considerar método de gas helio o correcciones específicas.
- Replicación mínima:  $n \geq 3$  por condición/horizonte; valores fuera de rango → revisar volumen y secado.
- Vincular con resistencia a la penetración e infiltración para un diagnóstico integral.

### Ejemplo numérico completo (paso a paso)

Densidad real (Dr) — método del picnómetro

- **Datos** (20 °C;  $\rho_w = 0,9982 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ):
- $C = 50,000 \text{ g}$  (picnómetro vacío)

- $A = 150,000 \text{ g}$  (picnómetro + agua, enrasado)
- $m_a = 20,000 \text{ g}$  (suelo al aire)
- $Hy = 4,0 \%$  (humedad higroscópica)  $\Rightarrow m = m_a \times (100 - Hy)/100 = 20 \times 0,96 = 19,200 \text{ g}$
- $B = 161,968 \text{ g}$  (picnómetro + suelo + agua, enrasado)

#### Cálculos:

- Volumen de sólidos:
- $V_s = \frac{(A-B)+m}{\rho_w} = \frac{(150,000-161,968)+19,200}{0,9982} = \frac{7,232}{0,9982} \approx 7,245 \text{ cm}^3$ .
- $D_r$ :  

$$D_r = \frac{m}{V_s} = \frac{19,200}{7,245} \approx 2,65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$
- Valor coherente con suelos minerales comunes.

#### B. Densidad aparente ( $d_a$ ) — cilindro cortante

Geometría del cilindro:  $d = 5,00 \text{ cm}$ ;  $h = 5,00 \text{ cm}$

Volumen:

$$V = \pi(d/2)^2 h = \pi(2,5)^2(5) \approx 98,175 \text{ cm}^3$$

Masa seca (105 °C):  $m_{\text{seca}} = 132,60 \text{ g}$

Cálculo:

$$d_a = \frac{m_{\text{seca}}}{V} = \frac{132,60}{98,175} \approx 1,35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

#### C. Porosidad total (Pt)

$$P_t = \left(1 - \frac{d_a}{D_r}\right) \times 100 = \left(1 - \frac{1,35}{2,65}\right) \times 100 \approx 49,1 \%$$

#### D. Interpretación por textura

- $D_r \approx 2,65$ : típico mineral.
- $d_a \approx 1,35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  y  $P_t \approx 49 \%$ : para una textura franco-arcillosa sugieren estructura adecuada; sin evidencia de compactación severa.
- Umbrales orientativos de compactación:
- Arcillosos:  $d_a \geq 1,40\text{--}1,60 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  (riesgo creciente).
- Franco-limosos:  $d_a \geq 1,55\text{--}1,65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .
- Arenosos:  $d_a \geq 1,65\text{--}1,75 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

#### 4. Plantilla editable: Densidad Real (Dr), Densidad Aparente (da) y Porosidad Total (Pt)

- **Instrucciones:** Complete las tablas con sus datos y luego calcule Dr, da y Pt con las fórmulas provistas. *Registre temperatura para corregir la densidad del agua ( $\rho_w$ ).*

##### 4.1 Densidad Real (Dr) – Método del picnómetro

| Variable                       | Descripción                                            | Valor (g) |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------|
| C                              | Masa picnómetro vacío y seco                           |           |
| A                              | Masa picnómetro + agua enrasada                        |           |
| $m_a$                          | Masa de suelo al aire (~20 g)                          |           |
| Hy (%)                         | Humedad higroscópica                                   |           |
| M                              | Masa de suelo seco ( $m = m_a \times (100 - Hy)/100$ ) |           |
| B                              | Masa picnómetro + suelo + agua (enrasado)              |           |
| $\rho_w$ (g·cm <sup>-3</sup> ) | Densidad del agua a T (≈0,998–1,000)                   |           |

- Fórmulas (Dr):
- $V_s = ((A - B) + m) / \rho_w$  (cm<sup>3</sup>)
- $Dr = m / V_s$  (g·cm<sup>-3</sup>)

##### 4.2 Densidad Aparente (da) – Cilindro cortante

| Variable                 | Descripción                                      | Valor |
|--------------------------|--------------------------------------------------|-------|
| d (cm)                   | Diámetro interno del cilindro                    |       |
| h (cm)                   | Altura interna del cilindro                      |       |
| V (cm <sup>3</sup> )     | Volumen ( $V = \pi \cdot (d/2)^2 \cdot h$ )      |       |
| $m_{\text{seca}}$ (g)    | Masa de suelo seco (105 °C)                      |       |
| da (g·cm <sup>-3</sup> ) | Densidad aparente ( $da = m_{\text{seca}} / V$ ) |       |
| Textura                  | Arcillosa / Franco / Arenosa                     |       |

### 4.3 Porosidad Total (Pt)

| Fórmula                         | Variables                                                                              | Resultado |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| $Pt = (1 - d_a/D_r) \times 100$ | $d_a \text{ (g}\cdot\text{cm}^{-3}\text{)}, D_r \text{ (g}\cdot\text{cm}^{-3}\text{)}$ |           |
|                                 |                                                                                        |           |

- Clasificación referencial:

| Propiedad                                   | Muy baja | Baja      | Media     | Alta              | Muy alta |
|---------------------------------------------|----------|-----------|-----------|-------------------|----------|
| $D_r \text{ (g}\cdot\text{cm}^{-3}\text{)}$ | —        | < 2,40    | 2,41–2,60 | 2,61–2,80         | > 2,80   |
| $d_a \text{ (g}\cdot\text{cm}^{-3}\text{)}$ | < 1,00   | 1,00–1,20 | 1,21–1,45 | 1,46–1,60         | > 1,60   |
| Pt (%)                                      | < 40     | 41–45     | 46–55     | 56–65             | > 65     |
| Umbral $d_a$ (arcillosa)                    | —        | —         | —         | $\geq 1,40$ –1,60 | —        |
| Umbral $d_a$ (arenosa)                      | —        | —         | —         | $\geq 1,65$ –1,75 | —        |

Ejemplo numérico (llenado de referencia)

- Picnómetro a 20 °C ( $\rho_w = 0,9982 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ):

| Variable  | Descripción                                 | Valor                                |
|-----------|---------------------------------------------|--------------------------------------|
| C         | Masa picnómetro vacío y seco                | 50,000 g                             |
| A         | Masa picnómetro + agua enrasada             | 150,000 g                            |
| $m_a$     | Masa de suelo al aire (~20 g)               | 20,000 g                             |
| $H_y$ (%) | Humedad higroscópica                        | 4,0 %                                |
| M         | Masa de suelo seco ( $m = 20 \times 0,96$ ) | 19,200 g                             |
| B         | Masa picnómetro + suelo + agua              | 161,968 g                            |
| $\rho_w$  | Densidad del agua (20 °C)                   | 0,9982 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ |

- Cálculos  $Dr: Vs = ((A - B) + m) / \rho_w = ((150,000 - 161,968) + 19,200) / 0,9982 = 7,245 \text{ cm}^3$
- $Dr = m / Vs = 19,200 / 7,245 = 2,65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
- Cilindro cortante:  $d = 5,00 \text{ cm}$ ;  $h = 5,00 \text{ cm}$  ( $V = \pi \cdot (2,5)^2 \cdot 5 = 98,175 \text{ cm}^3$ );  $m_{seca} = 132,60 \text{ g}$
- $da = 132,60 / 98,175 = 1,35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
- Porosidad total:  $Pt = (1 - da / Dr) \times 100 = (1 - 1,35 / 2,65) \times 100 = 49,1 \%$
- Interpretación: Textura franco-arcillosa con  $da \approx 1,35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  y  $Pt \approx 49 \%$  sugiere estructura adecuada; no hay evidencia de compactación severa (umbrales arcillosos  $\approx 1,40\text{--}1,60 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ).

## CAPÍTULO II: Interpretación de resultados físicos e hidrofísicos del suelo

### 1. OBJETIVO:

Interpretar los resultados analíticos de las principales propiedades físicas e hidrofísicas del suelo con el fin de identificar limitaciones a la productividad agrícola, explicar sus causas y proponer medidas de manejo y mejoramiento para suelos de igual origen o comportamiento.

### 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 2.1 Importancia de la evaluación físico-hidrofísica

Las propiedades físicas e hidrofísicas determinan la **aireación, drenaje, retención y disponibilidad de agua**. Su evaluación permite:

- Diagnosticar problemas como compactación, mal drenaje o baja retención.
- Relacionar los resultados de laboratorio con la textura, estructura y contenido de materia orgánica.
- Definir estrategias de manejo (labranza, riego, drenaje, fertilización).

Los principales factores limitantes derivados de estas propiedades son:

- Drenaje deficiente (saturación prolongada).
- Aireación insuficiente (anoxia radicular).
- Compactación (impide crecimiento radicular).
- Baja retención hídrica (déficit en periodos secos).
- Alta plasticidad (dificulta laboreo y drenaje).

### 3. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1 Evaluación de la textura

La **textura** indica la proporción relativa de arena, limo y arcilla. Se determina por análisis granulométrico y se clasifica mediante el **triángulo textural del USDA** (ver Edafología, pág. 163). Su influencia:

- Define la **capacidad de retención de agua** y la **porosidad total**.
- Regula la **aireación, infiltración y compactabilidad**.
- Condiciona la **plasticidad y la capacidad de campo**.

### 3.2 Densidad aparente ( $d_a$ )

La densidad aparente ( $d_a$ ) del suelo es una propiedad fundamental que describe la compactación del suelo y su capacidad para retener agua y aire, dos factores cruciales para la fertilidad y el desarrollo de las plantas. Se define como la masa del suelo por unidad de volumen, incluyendo los poros y el espacio vacío, lo cual influye directamente en la capacidad del suelo para permitir el paso de agua, aire y nutrientes. Una alta densidad aparente indica un suelo más compacto, lo que puede dificultar el crecimiento de las raíces y la infiltración de agua, mientras que una densidad baja sugiere una estructura más suelta, ideal para la aireación y el drenaje. A continuación, se presenta una tabla con la gama de valores de densidad aparente, su calificación y la interpretación práctica de cada rango, lo que permite evaluar el estado físico del suelo para su manejo adecuado y la toma de decisiones en la rehabilitación y mejora de suelos.

**Tabla XX Gama de Densidad Aparente ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) y su Interpretación Práctica**

| GAMA<br>( $\text{G}\cdot\text{CM}^{-3}$ ) | CALIFICACIÓN | INTERPRETACIÓN PRÁCTICA                     |
|-------------------------------------------|--------------|---------------------------------------------|
| < 1.0                                     | Muy baja     | Suelos orgánicos o muy esponjosos           |
| 1.0 – 1.2                                 | Baja         | Estructura suelta, buena aireación          |
| 1.21 – 1.45                               | Media        | Condiciones normales                        |
| 1.46 – 1.60                               | Alta         | Posible compactación o bajo contenido de MO |
| > 1.60                                    | Muy alta     | Compactación severa o textura arenosa densa |

#### Relaciones funcionales:

- $\uparrow d_a \Rightarrow \downarrow$  porosidad  $\Rightarrow \downarrow$  aireación y drenaje.
- $\downarrow d_a \Rightarrow$  estructura granular estable y buena porosidad.

#### Ejemplo:

Un suelo franco-arcilloso con  $d_a = 1,48 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  sugiere ligera compactación. Si el cultivo es sensible (raíces finas), requerirá labranza profunda o incorporación de materia orgánica.

### 3.3 Densidad Real (Dr) y su Interpretación

La densidad real (Dr) del suelo se refiere a la masa de las partículas sólidas del suelo por unidad de volumen, excluyendo los espacios porosos. A diferencia de la densidad aparente, la densidad real refleja solo el contenido sólido del suelo y es útil para determinar la composición mineralógica y la naturaleza de los materiales presentes. Esta propiedad es clave para entender las características de los suelos, ya que influye en la capacidad de retención de agua, la aireación y el comportamiento estructural del suelo. A continuación, se presenta una tabla con los rangos de la densidad real, su calificación y la interpretación práctica correspondiente:

**Tabla XXXX. Clasificación e interpretación de la densidad real (Dr) del suelo**

| <b>GAMA<br/>(G·CM<sup>-3</sup>)</b> | <b>CALIFICACIÓN</b> | <b>INTERPRETACIÓN</b>                             |
|-------------------------------------|---------------------|---------------------------------------------------|
| <b>&lt; 2.40</b>                    | Baja                | Suelo con alto contenido de materia orgánica (MO) |
| <b>2.4 – 2.6</b>                    | Media               | Valor típico de suelos minerales                  |
| <b>2.61 – 2.8</b>                   | Alta                | Abundancia de minerales pesados                   |
| <b>&gt; 2.8</b>                     | Muy alta            | Materiales ferromagnéticos o muy densos           |

Esta tabla permite clasificar los suelos según su densidad real, brindando una evaluación útil para determinar el tipo de material predominante y su impacto en el comportamiento físico del suelo, lo que es fundamental para su manejo agrícola y de conservación.

#### Usos:

- Cálculo de **porosidad total (Pt)**.
- Indicador indirecto de la **composición mineralógica y orgánica**.
- Valores inferiores a 2.5 suelen reflejar **horizontes ricos en humus**.

### 3.4 Porosidad Total (Pt) y su Interpretación

La porosidad total (Pt) del suelo es un parámetro fundamental para evaluar la capacidad de almacenamiento de agua y aire en el suelo, lo cual impacta directamente en el crecimiento de las plantas y la actividad microbiana. La porosidad total se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$P_t = \left(1 - \frac{d_a}{D_r}\right) \times 100$$

donde  $d_a$  es la densidad aparente y  $D_r$  es la densidad real del suelo. La porosidad total refleja la proporción del volumen del suelo ocupado por los espacios porosos, y su valor influye en la aireación, la infiltración y la capacidad de retención de agua del suelo.

A continuación, se presenta una tabla con los rangos de la porosidad total, su calificación y la interpretación del estado físico del suelo:

**Tabla 2. Clasificación e interpretación de la porosidad total (Pt) del suelo**

| GAMA (%) | CALIFICACIÓN | ESTADO FÍSICO DEL SUELO                    |
|----------|--------------|--------------------------------------------|
| < 40     | Muy baja     | Compacto, escasa aireación                 |
| 40 – 45  | Baja         | Limitante para raíces                      |
| 46 – 55  | Media        | Estructura normal                          |
| 56 – 65  | Alta         | Muy aireado, buen drenaje                  |
| > 65     | Muy alta     | Suelos orgánicos, riesgo de baja retención |

**Nota:** Por debajo del 45 %, el suelo suele presentar resistencia mecánica elevada y deficiente intercambio gaseoso.

Esta tabla permite evaluar el estado físico del suelo en función de su porosidad total, lo que ayuda a determinar la adecuación del suelo para actividades agrícolas y de conservación, así como a diseñar estrategias de manejo apropiadas.

### 3.5 Porosidad diferenciada

Permite discriminar entre poros de aireación (macroporos) y retención (microporos).

$$\text{Relación Agua/Aire} = \frac{\text{Microporos}}{\text{Macroporos}}$$

- Macroporos (>50  $\mu\text{m}$ ): Aireación, drenaje.
- Microporos (<50  $\mu\text{m}$ ): Retención de agua útil.  
Un equilibrio ideal: 1/3 macroporos – 2/3 microporos.

### 3.6 Capacidad de campo (CC)

La capacidad de campo (CC) es una propiedad clave que describe la cantidad de agua que un suelo puede retener después de haber sido saturado y drenar el exceso de agua. Esta propiedad es esencial para determinar la disponibilidad de agua para las plantas en un suelo, ya que define el umbral de retención de agua antes de que ocurra la marchitez permanente. Un suelo con buena capacidad de campo mantiene suficiente agua disponible para el crecimiento de las plantas sin riesgos de encharcamiento. A continuación, se presenta una clasificación de la capacidad de campo basada en su porcentaje en relación con la humedad en el suelo, lo que permite evaluar las condiciones físicas del mismo y su manejo hídrico adecuado.

**Tabla 3. Clasificación de la capacidad de campo (CC) según la retención de agua en el suelo**

| % HBSS    | CALIFICACIÓN | SIGNIFICADO                        |
|-----------|--------------|------------------------------------|
| < 20      | Baja         | Retiene poca agua; textura arenosa |
| 20 – 40   | Media        | Buen equilibrio hídrico            |
| 40,1 – 55 | Alta         | Retención óptima, buen manejo      |
| > 55      | Muy alta     | Suelo arcilloso; drenaje lento     |

#### Ejemplo:

$CC = 40 \%$ , *Marchitez permanente* = 23 %

→ *Agua útil* = 17 %.

*Si el límite productivo (Lp)* = 70 % de  $CC = 28 \%$ ,

→ *Agua útil eficiente* =  $40 - 28 = 12 \%$  **Hbss**.

### 3.7 Coeficiente de marchitez (CM)

El coeficiente de marchitez (CM) es un parámetro que mide el contenido de agua en el suelo que no es aprovechable por las plantas, es decir, el agua que se encuentra en el suelo después de que las plantas han alcanzado su punto de marchitez. Este valor es crucial para entender el balance hídrico de un suelo, ya que indica la cantidad de agua disponible para el crecimiento vegetal y permite evaluar la capacidad de un suelo para mantener la productividad agrícola bajo condiciones de riego limitadas. A continuación, se presenta la clasificación del coeficiente de marchitez, que refleja el nivel de agua no disponible en función de su porcentaje en el suelo.

**Tabla XX. Clasificación del coeficiente de marchitez (CM) según la disponibilidad de agua para las plantas**

| % HBSS      | CALIFICACIÓN |
|-------------|--------------|
| < 9.2       | Baja         |
| 9.2 – 24.3  | Media        |
| 24.4 – 45.8 | Alta         |
| > 45.8      | Muy alta     |

Refleja el contenido de agua no aprovechable por las plantas.

### 3.8 Humedad higroscópica (Hy)

La humedad higroscópica (Hy) es el agua que permanece adherida a las partículas del suelo en condiciones de baja humedad ambiental. Esta agua no está disponible para las plantas, ya que está fuertemente retenida en la superficie de las partículas del suelo por fuerzas capilares. La medición de la humedad higroscópica es importante para evaluar la capacidad del suelo para retener agua residual en situaciones secas, proporcionando una visión más precisa del balance hídrico del suelo en periodos sin precipitaciones o riego. La siguiente tabla muestra las categorías de humedad higroscópica en función de su porcentaje en el suelo.

**Tabla XX: Clasificación de la Humedad Higroscópica (Hy) en el Suelo**

| % HBSS    | CALIFICACIÓN |
|-----------|--------------|
| < 3.57    | Muy baja     |
| 3.58 – 10 | Baja         |
| 11 – 17.8 | Media        |
| > 17.8    | Alta         |

Indicador de la capacidad del suelo para **retener humedad residual** en condiciones secas.

### 3.9 Índice de plasticidad (IP)

El índice de plasticidad (IP) es una medida que se utiliza para evaluar la plasticidad del suelo, que es la capacidad del material para deformarse sin romperse cuando está húmedo. Este índice se calcula a partir de la diferencia entre los límites de plasticidad y liquidez, y su valor tiene implicaciones directas en la manejabilidad del suelo en condiciones de humedad. Los suelos con un índice bajo son fácilmente manejables y apropiados para labores agrícolas, mientras que aquellos con un índice más alto pueden presentar dificultades durante el manejo, especialmente en lo que respecta a la preparación del terreno y la siembra. Un IP elevado generalmente indica suelos con mayor cohesión y plasticidad, lo que puede ser un obstáculo para las actividades de cultivo y una limitante agroproductiva en situaciones de labranza.

**Tabla 3.9: Clasificación del Índice de Plasticidad (IP) en el Suelo**

| IP      | CLASIFICACIÓN        | EFFECTO                         |
|---------|----------------------|---------------------------------|
| < 15    | No plástica          | Suelo friable                   |
| 15 – 30 | Ligeramente plástica | Laboreo fácil                   |
| 30 – 45 | Plástica             | Dificulta el manejo             |
| > 45    | Muy plástica         | Limitante agroproductiva severa |

### 3.10 Velocidad de infiltración (Vi)

La velocidad de infiltración ( $V_i$ ) mide la rapidez con la que el agua se filtra en el suelo, un factor crítico que influye en la gestión del agua en la agricultura. Este parámetro determina cómo el agua se distribuye en la zona radical y si el suelo tiene suficiente capacidad para permitir un drenaje adecuado sin riesgos de anegamiento o pérdida excesiva por percolación. Los suelos con baja velocidad de infiltración tienden a tener problemas de drenaje, lo que puede provocar encharcamientos, mientras que aquellos con alta velocidad de infiltración, aunque favorecen el drenaje, pueden sufrir de una rápida pérdida de agua útil, especialmente en suelos arenosos o fisurados. La velocidad de infiltración es fundamental para la planificación de riegos eficientes y para evitar problemas de salinidad o acumulación de agua en la superficie.

**Tabla xxxx : Clasificación de la Velocidad de Infiltración del Suelo ( $V_i$ )**

| MM/H      | CALIFICACIÓN         | INTERPRETACIÓN                  |
|-----------|----------------------|---------------------------------|
| < 2       | Muy lenta            | Riesgo de anegamiento           |
| 2.1 – 5   | Lenta                | Drenaje deficiente              |
| 5.1 – 20  | Medianamente lenta   | Aceptable                       |
| 21 – 65   | Moderada             | Ideal                           |
| 66 – 125  | Moderadamente rápida | Buen drenaje                    |
| 126 – 250 | Rápida               | Posible pérdida por percolación |
| > 250     | Muy rápida           | Arenoso o fisurado              |

#### 4. ACTIVIDADES Y EJERCICIOS

1. Clasifique texturalmente el suelo y describa variaciones por horizonte.
2. Calcule el **peso de la hectárea-surco** con los valores de da obtenidos.
3. Determine si existe **compactación**: relacione da con Pt y Vi.
4. Evalúe la **plasticidad** y el **tempero**: ¿es adecuado para el laboreo?
5. Si la humedad actual = 38 % Hbss, determine si conviene labrar.
6. Analicé el perfil en función de Pt, macroporosidad y Vi → drenaje interno.
7. Calcule y evalúe la **capacidad de retención hídrica** por horizonte.
8. Con CC y CM:
  - Agua útil (% Hbss)
  - Humedad a Lp (80 % CC)
  - Agua disponible eficiente (% Hbss)
9. Evalúe el **estado hídrico** (3 %, 25 %, 45 %):
  - Clasificación física y biológica del agua.
  - Movimiento y disponibilidad para la planta.
10. Enumere y jerarquice las **limitantes físicas e hidrofísicas** detectadas.

# RECOMENDACIONES DE USO Y MANEJO DE SUELOS CON LIMITANTES QUÍMICAS, FISICOQUÍMICAS, FÍSICAS E HIDROFÍSICAS

## 1. Objetivo

Establecer, a partir de resultados analíticos e interpretación integrada del perfil, las principales **limitantes de la agroproduktividad** y un **plan de uso, manejo y mejora** (secuenciado, justificable y costo-efectivo) para suelos de igual origen.

## 2. Metodología de trabajo (secuencia operativa)

### 2.1 Inventario de evidencias (perfil y laboratorio)

- Morfología (horizontes, estructura, consistencia, drenaje/aireación), textura.
  - Química y fisicoquímica: pH, Y1/Y2/Y3, CEC (T), S, V, MO,  $\text{CO}_3^{2-}$ , SST/ECe, ESP, SAR.
  - Hidrofísica: da, Dr, Pt, porosidad diferenciada, CC, CM, Hy, Vi.
1. **Listado inicial de limitantes posibles** (no excluyente): acidez; baja fertilidad; salinidad; sodicidad; calcáreo; drenaje y aireación deficientes; compactación; elevada plasticidad; baja retención hídrica; **escasa profundidad efectiva**; riesgo de inundaciones; erosión; relieve; pedregosidad; rocosidad.
  2. **Evaluación por horizonte** de parámetros clave asociados a cada limitante (confirmación/descartes).
  3. **Determinación de limitantes vigentes** (sí/no) y **valoración de su intensidad y efectos**.
  4. **Priorización** (ver matriz 2.2) y **análisis causal** (natural vs antropogénica).
  5. **Plan integrado de uso** (rotaciones, cultivos/vegetación permanente) y **mejoras** (prácticas físicas, hidrotécnicas, biológicas y/o químicas), con **secuencia y cronograma**.

### 3. Criterios de priorización y decisión

#### 3.1 Principios de orden de prioridad

- **Intensidad (severidad):** magnitud del desvío respecto a umbrales.
- **Efectos desfavorables:** pérdida de rendimiento/viabilidad, degradación del suelo.
- **Causas:** con igual intensidad y efectos, **priorizar causas antropogénicas** (son reversibles con manejo).
- **Factibilidad y costo-beneficio:** adoptar primero medidas de **alto impacto y baja inversión**.

#### 3.2 Principios para definir el uso del suelo

- **Suelos con buena profundidad efectiva y mecanizables:** rotaciones con especies **tolerantes** a la condición inicial; tras mejora, introducir especies **más exigentes**.
- **Profundidad efectiva limitada y/u obstáculos a mecanización:** **pastos → frutales → forestales** (en ese orden, según severidad y heterogeneidad espacial).
- **Mejoras no rentables** (p. ej., calcáreos con carbonatos profundos, drenaje muy deficiente en llanuras sin salida, plásticos muy expansivos): **adaptar cultivos** al suelo y no al revés.

#### 3.3 Principios generales de mejoramiento

- Atacar **la causa**, no solo el efecto.
- Conjuntos de limitantes: **mejorar primero la limitante “cuello de botella”** (la que impide que el resto de las acciones rindan).
- Medidas **técnica y económicamente factibles**; priorizar aquellas de **alto retorno**.
- Siempre que sea viable, **adaptar** material vegetal y prácticas al sitio.

### 4. Recomendaciones específicas por limitante (síntesis accionable)

#### 4.1 Acidez ( $pH < 5.5$ ; $Y3 > 0$ )

- **Evitar** fertilización amoniacal ácida indiscriminada; **mejorar riego** para evitar lixiviación excesiva.

- **Encalado** (neutralizar **Y3** preferentemente): norma por **Y3**; **incorporación homogénea** a h (profundidad radicular), **siembra tras 4–8 semanas** según lluvias.
- **Cultivos tolerantes** si el costo de elevar pH a neutralidad no se justifica.

#### 4.2. Baja fertilidad (T baja; S/T bajo; MO baja)

- **Materia orgánica** (abonos, compost, residuos); **abonos verdes** y raíces profundas.
- **Fertilización** (balance N-P-K-S-Ca-Mg + micro), **biofertilizantes**; en arenas, **riego por goteo** y fraccionamiento.
- **Zeolitas** u otros intercambiadores cuando sea **rentable**.

#### 4.3 Salinidad ( $EC_e > 4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ )

- **Drenaje funcional + lavado** (fracción de lixiviación, LR) dimensionada al objetivo  **$EC_e^*$**  del cultivo.
- Evitar re-salinización (control de  **$EC_w/RAS$**  del riego; **mezclas/blending** si procede).
- Coberturas para **reducir evaporación** y flujo capilar ascendente.

#### 4.4 Sodicidad ( $ESP \geq 15$ o $SAR \geq 13$ ; pH 8.5–10)

- **Enmienda cálcica** (*yeso*/ $CaCl_2$ ) o **formadores de ácido** ( $S^0/H_2SO_4$  si hay  $CaCO_3$ ) para **reemplazar  $Na^+$**  en intercambio.
- **Lavado subsecuente + drenaje**.
- Subsoleo/labranza profunda cuando haya **capas densas**; MO y coberturas para recuperar **estructura**.

#### 4.5 Suelos calcáreos ( $CO_3^{2-}$ activo; pH 7.5 – 8.4)

- **Adaptación de cultivos/variedades**; evitar inversión del prisma si hay **carbonatos** en profundidad.
- **Azufre** para eliminar carbonatos **no es rentable** a escala campo; manejar **micronutrientes** (Fe, Zn) en quelatos si hay clorosis.

#### 4.6 Drenaje deficiente / Aireación deficiente

- **Nivelación/alisado**; **drenaje superficial** (surcos/canales) y **subsuperficial** (tubos/zanja, según permeabilidad).

- Sembrar en **camellón** sobre capas poco permeables; **labores en tempero; MO y estructura**.
- Considerar **canales de desviación** si aportes laterales.

#### 4.7 Compactación (da↑, Pt↓, Vi↓)

- **Control de tráfico**, evitar labores con **humedad alta**; **subsoleo** orientado a romper capa restrictiva.
- **Labranza conservacionista, MO**, raíces bioperforantes (abonos verdes).

#### 4.8 Baja retención hídrica (CC baja; arenas)

- **Coberturas y residuos** para reducir evaporación; **no invertir** el prisma; **MO** para aumentar microporos.
- En zonas <800 mm/año: **captación de agua** (curvas a nivel, fajas, terrazas de absorción).

#### 4.9 Elevada plasticidad (IP>45)

- **Labores en tempero; laboreo mínimo**; drenaje y aireación para acortar el periodo plástico.
- **Adaptar cultivos** con menor demanda de laboreo.

#### 4.10 Profundidad efectiva limitada

- Por capas compactas/concreciones/piso de arado: subsoleo (si es rentable); cultivos adaptados.
- Por materiales consolidados/pedregosidad/rocosidad: pastos/frutales/forestales; nichos con martillo neumático/explosivos cuando proceda.
- Por carbonatos tóxicos o freático somero: adaptar cultivos; drenaje si es viable.

#### 4.11 Erosión hídrica y relieve

- **Clases agrológicas II–IV**: rotaciones con densos y coberturas; siembra en contorno, fajas, terrazas simples, canales de desviación; **laboreo mínimo**; evitar quemas.
- **Clases IV–VII**: transición a **pastizales/forestales** y **sistemas mecánicos** solo si hay **rentabilidad**.

#### 4.12 Pedregosidad/Rocosidad

- **Vegetación permanente** según intensidad; **extracción mecánica selectiva** donde sea rentable; evitar quemas.

### 5. Cálculos clave para decisiones

#### 5.1 Fertilidad: S y V

- $S = \sum \text{bases cambiables (Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{K}^+, \text{Na}^+)$
- $V(\%) = 100 \cdot S/T$ 
  - **V bajo con T bajo:** baja CEC (textura/MO) → priorizar **MO**.
  - **V bajo con T alto:** déficit de bases → **encalado/fertilización básica**.

#### 5.2 Encalado (acidez tóxica)

- **Norma (N, t·ha<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub>)** por Y3:  $N = Y_3 \cdot 0,075 \cdot d_a \cdot h$
- **Dosis activa (Da)** para material con **VN/CCE** (poder neutralizante):

$$Da = N \cdot \frac{100}{VN}$$

Dosis física (Df) corrigiendo humedad (H%), impurezas (I%), grosor (K%  
>1 mm):

$$Df = Da \cdot \frac{100^3}{(100 - H)(100 - I)(100 - K)}$$

Para materiales con **pureza** y **finura** declaradas, utilizar **ENP**  $\approx$  **VN**  $\times$  (**pureza/100**)  $\times$  (**finura/100**) en lugar de VN.

#### 5.3 Sodicidad (requerimiento de yeso, GR)

$$GR (t \text{ ha}^{-1}) \approx 0,86 \times CEC \times (ESP_0 - ESP_f) \times d_a \times h$$

- **Ajuste por ENP** del yeso (o equivalentes de Ca<sup>2+</sup> disponibles).
- **Aplicación fraccionada** + drenaje/lavado + MO/estructura.

#### 5.4 Guía para selección de enmienda (caso práctico solicitado)

**Materiales disponibles:**

**Cal apagada, Ca(OH)<sub>2</sub>** — VN = 120 %, H=10 %, **pureza 85 %**, finura (<1 mm) 95 %.

ENP  $\approx 1.20 \times 0.85 \times 0.95 = 0.969 \rightarrow 96.9 \%$ .

- **Azufre elemental ( $S^0$ )** — H=15 %, I=10 %, >1 mm=12 % (requiere **tiobacterias** y  $CaCO_3 \geq 1$  % para formar yeso in situ; óptimo en **verano**; mezclar fino).
- **Yeso,  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$**  — H=20 %, I=18 %, >1 mm=25 % (ajustar por **ENP** del producto; criterio económico por **kg de  $Ca^{2+}$  útil y logística** a 50 km).

#### Decisión orientativa:

- **Acidez tóxica (Y3):** preferir **cal** por mayor **VN/ENP** y rápida neutralización de  $H^+/Al^{3+}$ ; calcular **Df** con su H/I/K.

**Sodicidad (ESP/SAR altos):** preferir **yeso** (o  $S^0$  si hay  $CaCO_3$ ) para **aportar  $Ca^{2+}$**  sin elevar en exceso el pH; dimensionar **GR** y **Df**; requerir **drenaje y lavado**.

Costo efectivo (comparativo):

$$$/kg CaCO_3 eq \approx \frac{\$/t}{1000 \times ENP}$$

Seleccionar el menor costo por kg  $CaCO_3$  equivalente (o por kg  $Ca^{2+}$  utilizable en suelos sódicos), ponderando logística y reactividad.

#### Actividades para la sesión integradora (con el Perfil N.º 2)

- Verificación de S y V (primer horizonte): recalcular desde bases cambiables y T.
- Coherencia interna: detectar incongruencias entre textura–Pt–da–Vi–CC–CM–Hy–pH–ECe–ESP/SAR (proponer valores plausibles).
- Priorizar limitantes (usar matriz 2.2):
  - Evidencias, causas y efectos por limitante (perfil completo).
- Uso agrícola propuesto:
  - Ciclos cortos en rotación vs vegetación permanente (pastos/frutal/forestal), con justificación.
- Plan integrado de manejo (orden lógico):
  - Físicas/hidrotécnicas/biológicas y, si procede, químicas; cronograma y requisitos (drenaje, equipo, época).
- Enmiendas químicas (si aplica):
  - Elegir material, calcular Da/Df y establecer cuándo, cómo, dónde y cuánto.
  - Documentar: horizonte, h, da, fecha, maquinaria, estado del drenaje.
  - Riesgo de re-degradación: controles y monitoreo (ECe, ESP, Vi, da/Pt, CC; 6–8 semanas y fin de temporada).

#### Productos esperados (evaluables)

- **Hoja de diagnóstico** por horizonte (parámetros, umbrales y fallo dominante).
- **Matriz de priorización** completa y orden de intervención.
- **Mapa/diagrama de manejo** (qué, dónde, cuándo, con qué).
- **Cómputos** (S, V, Da, Df o GR, LR, volumen de lavado).
- **Justificación técnico-económica** (1–2 párrafos) y **plan de seguimiento**.

## 5.5 TALLER INTEGRADOR DEL TEMA

### Uso, manejo y rehabilitación de suelos a partir de resultados analíticos

#### *Objetivo*

Recomendar medidas de manejo orientadas al uso y rehabilitación de los suelos, verificando coherencia cuantitativa entre propiedades e interpretando resultados químicos, fisicoquímicos, biológicos, físicos e hidrofísicos.

#### *1) Preparación previa*

- Repasar la Guía integradora del Tema I y el ejercicio resuelto anterior.
- Tener a mano el triángulo textural, tablas de evaluación (da, Dr, Pt, CC, CM, Hy, IP, Vi) y umbrales de pH, Y1–Y3, T, S, V,  $\text{CO}_3^{2-}$ , SST/ECe, Na, ESP/SAR.

#### *2) Metodología de trabajo (por equipos: Suelos 1, 3 y 4)*

##### **Paso A — Hoja de control por horizonte**

Para cada horizonte del suelo asignado:

- Textura (arena-limo-arcilla) → clase textural.
- da, Dr →  $\text{Pt} = (1 - \text{da}/\text{Dr}) \cdot 100$  y contraste con Pt reportada (si existe).
- Porosidad diferenciada: comparar macroporos vs ( $\text{Pt} - \text{macroporos}$ ) y relacionar con Vi.
- Humedad: CC, CM, Hy → agua útil ( $\text{AU} = \text{CC} - \text{CM}$ ) y agua eficiente a Lp (70–80 % CC).
  - Química:** pH, Y1–Y3, T, S, V, bases (Ca, Mg, K, Na),  $\text{CO}_3^{2-}$ , SST/ECe (si procede).
  - Sodicidad** (si falta ESP/SAR): inferir **riesgo** con Na y relación  $\text{Na}/(\text{Ca}+\text{Mg})$ .
  - Morfología esperada** (según datos): estructura, consistencia, drenaje/aireación (coherencia).

- IV. **Entrega:** una tabla por horizonte con **cálculos y semáforo** (verde: coherente; amarillo: revisar; rojo: inconsistente).

#### **Paso B — Chequeos de coherencia (mínimos obligatorios)**

- **Pt** calculada vs **Pt** reportada (o ausente):  $Pt = (1 - da/Dr) \cdot 100$ .
- **T**  $\approx$  **Ca+Mg+K+Na** (cmolc·kg<sup>-1</sup>) y **S** = suma de bases: comprobar **V** = **100·S/T**.
- **Vi** compatible con textura y macroporos:
  - Arenas y macroporos altos → Vi **moderada-rápida**.
  - Arcillas, macroporos bajos → Vi **lenta**.
- pH alto con CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>: calcáreo verosímil; pH 8.5–10 + Na alto: sodicidad probable.

Dr fuera de rango (2.40–2.80 g·cm<sup>-3</sup> minerales): revisar método/datos.

#### **Paso C — Diagnóstico de limitantes y priorización**

- Liste **limitantes** por horizonte (acidez, baja fertilidad, salinidad, sodicidad, calcáreo, drenaje/aireación deficiente, compactación, baja retención, plasticidad, etc.).
- **Priorice** con una rúbrica (intensidad, efectos, causa antropogénica, factibilidad/costo-beneficio).
- Concluya con **2–4 cuellos de botella** a intervenir **primero**.

#### **Paso D — Recomendaciones de uso y manejo**

- **Uso agrícola:** rotaciones vs vegetación permanente (pastos/frutal/forestal), según **profundidad efectiva** y mecanización.
- **Manejo físico/hidrotécnico/biológico** (subsuelo, labranza, drenajes, coberturas, MO).
- **Enmiendas químicas** solo si **diagnóstico** lo exige (encalado por Y3; yeso/S<sup>0</sup>/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> por sodicidad).
- **Plan secuenciado** (qué, dónde, cuánto, cuándo, cómo) + **monitoreo** (ECe, ESP/SAR, Vi, da/Pt, CC).

#### **Observaciones técnicas sobre la tabla entregada (ayuda diagnóstica)**

##### **SUELO 1**

- **Textura:** arenosa en A1–A12 → **arcillosa** hacia B2 (↑ arcilla del 10 % al 65 %).
- **Hidrofísica:** Vi **130 → 40 mm·h<sup>-1</sup>** en A1–A12 (coherente con ↓ macroporos y ↑ CC).
- **Química** (A1→B2): **T** sube 5.3→19.4; **S** 2.39→8.33; **V** 45→42.9 % (estable-bajo). **Na** aún bajo (≤1.12).

- **Lectura:** posible **compactación** intermedia (B1–B2: macroporos bajos), **baja fertilidad** relativa ( $V \sim 45\text{--}50\%$ ), **retención hídrica** creciente en profundidad (CC 14→27 % Hbss).
- **Manejo:** **labranza conservacionista + subsoleo localizado** si se verifica capa densa, **MO** y residuos, **fertilidad básica** (Ca–Mg–K) en A1–A12.

### SUELO 3

- **pH 7.8–8.2**,  $\text{CO}_3^{2-}$  presente (1.2→12.4 %) y **Na alto** (6.82→10.44  $\text{cmolc}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).
- **T, S, V** no reportados: deben **calcularse** ( $S = \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Na}$ ;  $V = 100 \cdot S / T$ ).
- **da 0.82–1.03** y **Dr 2.61–3.01** ( $Dr > 2.8$  es atípico para suelos minerales comunes: **revisar** determinación).
- **Indicios:** **calcáreo** con **tendencia a sodicidad** (pH alto + Na elevado); **Pt** no reportada → **calcular** y cotejar con macroporos (7–17 %) y  $V_i$  (94–98  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ).
- **Manejo:** si **ESP/SAR** confirman sodicidad → **yeso** (o  $\text{S}^0$  si hay  $\text{CaCO}_3$  suficiente), **drenaje + lavado**; **coberturas/MO** para estabilizar estructura.

### SUELO 4

- **pH 8.6–8.9**,  $\text{CO}_3^{2-}$  0.8→10.4 %, **Na muy alto** (13.30; 11–10  $\text{cmolc}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).
- **Dr 3.04–3.38 (excesivo):** sugiere **error de laboratorio** o **materiales pesados** no representativos; **repetir** Dr y recalcular **Pt** (no reportada).
- **Macroporos** muy **bajos** (4.6–9.6 %) con **CC muy alta** (60–81 % Hbss): riesgo de **aireación deficiente**.
- **Indicios fuertes de suelos sódicos/salino-sódicos** (pH alto + Na alto). Falta **ECe/ESP/SAR**: **medir** para confirmar.
- **Manejo:** **enmienda cálcica (yeso)** ajustada por **ENP**, **drenaje y lavado**; **labores en tempero, laboreo mínimo, MO**.

### *Incongruencias a corregir (recomendado):*

1.  $Dr > 2.8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  en Suelos 3–4 → repetir (picnómetro/método helio).
2. Na “10-46” (S4 B21) parece 10.46.
3. **Pt** ausente en varios horizontes → calcular con **da/Dr**.
4. Falta **ECe, ESP, SAR** en Suelos 3–4 → imprescindibles para clasificar salino/sódico.

5. Revisar  $V_i$  vs macroporos cuando la relación sea discordante ( $>100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  con macroporos  $<8-10 \%$ ).

### ***Cálculos y decisiones que el equipo debe realizar***

1.  $S \text{ (cmolc} \cdot \text{kg}^{-1}) = \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Na}$ ;  $V(\%) = 100 \cdot S/T$ .
2.  $Pt(\%) = (1 - d_a/Dr) \cdot 100$ ; agua útil =  $CC - CM$ ; agua eficiente =  $CC - Lp$  ( $Lp$  70–80 %  $CC$ ).
3. Si acidez tóxica ( $Y_3 > 0$ ): Norma de  $\text{CaCO}_3$   $N = Y_3 \cdot 0.075 \cdot d_a \cdot h$ ;  $Da$  y  $Df$  con  $VN/ENP$  y  $H/I/K$ .
4. Si sodicidad ( $ESP/SAR$ ): Requerimiento de yeso  $GR \approx 0.86 \cdot CEC \cdot (ESP_0 - ESP_f) \cdot d_a \cdot h$ ;  $Da/Df$  con  $ENP$  y  $H/I/K$ .
5. LR (lixiviación) orientativa para  $E_{Ce}^*$  de cultivo y  $EC_w$  (si hay riego).
6. Plan secuenciado con cronograma y monitoreo (6–8 semanas; fin de temporada).

### ***Formato de informe del equipo (entrega)***

- Resumen ejecutivo (½ página): limitantes críticas y plan propuesto.
- Diagnóstico por horizonte (tabla con cálculos y semáforo).
- Matriz de priorización (puntajes y orden de intervención).
- Plan de uso y manejo (medidas físicas/hidrotécnicas/biológicas/químicas; dosis y logística).
- Cómputos ( $S$ ,  $V$ ,  $Pt$ ,  $AU$ ,  $Da/Df$  o  $GR$ ,  $LR$ ) con supuestos.
- Monitoreo y riesgos (re-salinización, re-compactación, aireación).
- Anexos: correcciones de datos incoherentes y justificación.

### ***Mini-ejemplo de control (SUELO 1, A1)***

- $d_a=1.45$ ;  $Dr=2.70 \rightarrow Pt = (1-1.45/2.70) \cdot 100 = 46.3 \%$  (coincide).
- $T=5.30$ ;  $S=2.39 \rightarrow V = 100 \cdot 2.39/5.30 = 45.1 \%$  (coincide 45.0).
- Lectura: porosidad media-baja,  $V$  moderado-bajo  $\rightarrow$  MO + fertilidad básica;  $V_i$  alta compatible con textura arenosa.

### ***Nota para la exposición***

- Cada equipo debe mostrar 1 inconsistencia encontrada, proponer su corrección y explicar cómo esa corrección cambia las decisiones de manejo.
- Si el laboratorio permite, solicitar  $E_{Ce}$ ,  $ESP$  y  $SAR$  para Suelos 3 y 4 antes de emitir una recomendación química definitiva.

# DIAGNÓSTICO DE PROCESOS EROSIVOS EN CAMPO Y VÍAS DE CONTROL

## I. Objetivos

- **Identificar en campo** manifestaciones de erosión hídrica y eólica, y **evaluar** factores y causas asociadas.
- **Proponer medidas de manejo y control** compatibles con el uso actual y con escenarios de **uso sostenible**.

## II. Preparación previa del estudiante

Revise: (i) causas y mecanismos de erosión hídrica (impacto de gotas, escorrentía laminar, en surcos y cárcavas) y eólica (deflación, abrasión, transporte en suspensión/salteo), (ii) factores **RUSLE** ( $R$ ,  $K$ ,  $LS$ ,  $C$ ,  $P$ ), (iii) criterios de aptitud/limitantes del suelo (textura, estructura, pedregosidad, profundidad efectiva), (iv) prácticas de **conservación** (agronómicas, mecánicas, hidrotécnicas y biológicas) y sus **condiciones de aplicación**.

## III. Fundamentos operativos para el diagnóstico

### 3.1 Tipos y formas de erosión (reconocimiento rápido)

#### Hídrica

- Laminar: barnizado superficial, costras; pérdida uniforme de finos.
- En surcos (rill): microcanales intermitentes (profundidad  $\lesssim 30\text{--}40$  mm).
- Cárcavas (gully): canales permanentes (Prof.  $\gtrsim 30\text{--}40$  cm), socavación en cabecera, taludes activos.
- Deslizamientos/flujo: remoción en masa asociada a saturación (no es erosión “clásica” pero co-ocurre).

#### Eólica

- Deflación: hoyas, exposición de horizontes/pedregosidad.
- Acumulación: dunas, rizaduras; sotavento de barreras vivas/construcciones.

### 3.2 Factores de control (marco **RUSLE** para erosión hídrica)

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

- **R (erosividad de lluvia)**: intensidad–duración–frecuencia.

- **K (erodabilidad del suelo):** textura, MO, estructura y permeabilidad.
- **LS (longitud y pendiente de ladera):** controla la potencia de la escorrentía.

**Aproximación práctica:**

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22,13}\right)^m \cdot (65,41 \sin^2 \theta + 4,56 \sin \theta + 0,065)$$

con  $\lambda$ = longitud de ladera (m),  $\theta$ = ángulo de pendiente,  $m \approx 0,4-0,6$ .

- **C (cobertura/uso):** fracción reductora por **cobertura vegetal** y manejo.
- **P (prácticas):** labranza en contorno, fajas, terrazas, zanjas de infiltración, etc.

Para **erosión eólica**, use la lógica WEQ/RWEQ (viento, rugosidad, cobertura, humedad y *erodibilidad del suelo*). En campo, enfatice **cobertura viva/muerta y barreras rompeviento**.

### 3.3 Indicadores morfológicos y funcionales (lista de verificación)

- **Superficie:** costra, sellado, barniz; *rills* (n.º/10 m, prof./anchura), cárcavas (prof., ancho, retroceso de cabecera [m/año]).
- **Cobertura:** % cobertura viva + mulch (cuadros 1 m²).
- **Pendiente:** % y longitud de ladera (cinta + clinómetro).
- **Infiltración:** anillo infiltrómetro (mm·h<sup>-1</sup>) o prueba cualitativa (tiempo de encharcamiento).
- **Suelo:** textura (prueba manual), estructura (granular/bloques), densidad aparente indicativa (penetrómetro/calicata), pedregosidad.
- **Hidrología local:** conectividad de escorrentía (calles de agua, huellas de rueda), puntos de concentración (bordes de camino, cunetas).
- **Eólica:** costras desnudadas, acumulación sotavento, cortes de raíces, polvo en suspensión.

### Metodología de trabajo en campo (paso a paso)

1. **Planificación y seguridad:** EPP, acceso, pronóstico, permisos; dividir el área en **unidades de ladera/uso**.
2. **Estaciones de muestreo** (al menos 3 por unidad): **cabecera-medio-pie de ladera**.
3. **Mediciones básicas:**

- Pendiente (%) y **longitud de ladera** (m).
  - **Cobertura** (% viva/muerta) en 3–5 cuadrantes 1 m<sup>2</sup>.
  - **Rills** (n.º/10 m, prof.) y **cárcavas** (prof./ancho/long.).
  - **Vi** (si es posible): anillo o test de infiltración simple.
  - Textura “al tacto”, estructura, costra, pedregosidad.
  - **Registro fotográfico georreferenciado** (cabecera, tramo medio, detalle).
4. **Hoja de datos** (una por estación): incluya uso, cultivo, labranza, drenajes, prácticas de conservación, signos de erosión, métricas y croquis.
  5. **Diagnóstico rápido**: tabla de severidad (ver V.1).
  6. **Priorización**: matriz severidad × conectividad × valor productivo × factibilidad.
  7. **Medidas**: seleccione portafolio (agronómicas, mecánicas, hidrológicas, biológicas) y **secuencia de implementación**.
  8. **Monitoreo**: puntos de control para mediciones repetidas (rills/cárcavas, % cobertura, fotos fijas).

## IV. Herramientas de evaluación y decisión

### 4.1 Escala de severidad (campo)

La erosión del suelo es un proceso natural, pero acelerado por actividades humanas como la deforestación, la agricultura intensiva y el pastoreo. Este indicador permite clasificar los suelos según su grado de erosión, observando varios factores como el porcentaje de suelo desnudo, la presencia de rills y cárcavas, la velocidad de infiltración (Vi), y la formación de costras o sellados. La clasificación ayuda a identificar el riesgo de pérdida de suelo y la necesidad de aplicar medidas de conservación adecuadas.

**Tabla 2.11: Clasificación de la Erosión Eólica y Hídrica en Suelos**

| INDICADOR                | BAJA | MODERADA | SEVERA  | MUY SEVERA |
|--------------------------|------|----------|---------|------------|
| % SUELO DESNUDO          | <20  | 20–40    | 40–70   | >70        |
| N.º RILLS /10 M          | 0–1  | 2–4      | 5–8     | >8         |
| PROF. RILL (MM)          | <10  | 10–30    | 30–60   | >60        |
| PROF. CÁRCAVA (CM)       | –    | <30      | 30–100  | >100       |
| VI (MM·H <sup>-1</sup> ) | >65  | 21–65    | 5–20    | <5         |
| COSTRA/SELLADO           | No   | Local    | Extenso | Continuo   |

Ajuste con **pendiente y longitud de ladera**: a igual morfología, pendientes largas/altas → **subir categoría**.

#### 4.2 Matriz de priorización (ejemplo de puntuación 1–5)

- **Severidad** (tabla anterior)
- **Conectividad hidrológica** (¿descarga a cauce/camino/parcelas?)
- **Valor productivo estratégico** (cultivo/infraestructura)
- **Factibilidad/costo** (materiales, maquinaria, mano de obra)
- **Riesgo a corto plazo** (evento lluvioso, época)

Ordene por **puntaje total** y ataque primero los **puntos de control** (cabeceras de cárcavas, drenajes mal resueltos, caminos).

### V. Medidas de manejo y control (portafolio orientativo)

#### 5.1 Agronómicas/biológicas

- **Cobertura permanente** (abonos verdes, mulching 4–8 t MS·ha<sup>-1</sup>).
- **Rotaciones** con cultivos de cobertura/raíces fasciculadas.
- **Siembra en contorno y labranza mínima/no-labranza**.
- **Barreras vivas** (vetiver, *Pennisetum*, leñosas): espaciamiento aproximado

$$S_{barrera}(m) \approx \frac{100}{\text{pendiente}(\%)} (\text{ajuste por lluvia/suelo})$$

- **Cortinas rompeviento** (eólica): altura efectiva ≈ 10–15 × altura de barrera; porosidad 40–50 %.

#### 5.2 Mecánicas/hidrotécnicas

- **Curvas a nivel y fajas en contorno** (ancho de faja ↓ con ↑ pendiente).
- **Zanjas de infiltración** (sección trapezoidal 0,3–0,6 m; espaciamiento según pendiente).
- **Terrazas** (de banca o de absorción) para laderas >12–15 % donde sea **económicamente viable**.
- **Cierres y disipadores** en **cárcavas**: estructuras de retención (gaviones, madera tratada, enrocados) + **revegetación** de taludes y cabecera.
- **Caminos rurales**: cunetas revestidas donde proceda, **pasos de agua** a intervalos, lomos de burro hidráulicos, **salidas protegidas** (enrocado/geotextil).

Toda **práctica mecánica** debe acompañarse de **cobertura y manejo del tránsito**; de lo contrario, su eficacia se reduce drásticamente.

## VI. Formatos de campo (listos para copiar/pegar en su documento)

### A) Hoja de estación (por unidad de ladera)

- Código estación / UTM:
- Fecha / equipo:
- Uso actual / cultivo / labranza:
- Pendiente (%) / Long. ladera (m):
- Cobertura viva (%) / Mulch (%):
- Rills (n.º/10 m; prof. mm):
- Cárcava (prof. cm / ancho cm / long. m / retroceso cabecera m):
- Vi ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ) / costra (sí/no):
- Textura (tacto) / estructura / pedregosidad:
- Conectividad (¿descarga a cauce/camino/parcelas?):
- Fotos (IDs):
- Observaciones:
- B) Resumen por unidad (diagnóstico y medidas)
- Severidad (tabla V.1): ☐ Baja ☐ Mod. ☐ Severa ☐ Muy severa
- Causas dominantes: lluvia intensa / pendiente / manejo / caminos / riego / viento
- Medidas recomendadas (secuenciadas):
  1. ... (inmediata, punto crítico)
  2. ... (corto plazo)
  3. ... (siembra/rotación, cobertura)
  4. ... (obra mayor, si aplica)
- Monitoreo: indicadores, frecuencia, punto de foto fija.

## VII. Mini-ejemplo aplicado (cálculo rápido con RUSLE)

- Pendiente = 12 % ( $\theta \approx 6,84^\circ$ ), long. ladera  $\lambda = 120 \text{ m} \rightarrow$

$$LS \approx \left(\frac{120}{22,13}\right)^{0,5} \cdot (65,41 \sin^2 6,84^\circ + 4,56 \sin 6,84^\circ + 0,065) \approx 3,0$$

- K (franco-arcillosa con MO media): 0,032
- C (cultivo anual con 40 % cobertura): 0,20
- P (contorno sin terrazas): 0,60

- **R** (valor local de referencia; si no se dispone, usar rango regional y documentar el supuesto), ej.: 8 000 MJ·mm·ha<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>·a<sup>-1</sup>.

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \approx 8000 \cdot 0,032 \cdot 3,0 \cdot 0,20 \cdot 0,60 \\ \approx 92 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$$

Lectura: >50 t·ha<sup>-1</sup>·a<sup>-1</sup> es crítico → se requieren barreras vivas + fajas en contorno, zanjas de infiltración, evaluar terrazas y elevar cobertura (C≤0,05).

## VIII. Entregables del taller (equipo)

1. **Mapa/ croquis** de unidades de ladera y puntos críticos.
2. **Hojas de estación y resumen por unidad.**
3. **Matriz de priorización** con justificación.
4. **Carpeta fotográfica** con pies de foto.
5. **Plan de medidas** (técnico, secuenciado, con criterios de éxito y monitoreo).

## IX. Criterios de evaluación

- **Rigurosidad del diagnóstico** (mediciones, coherencia morfológica-funcional).
- **Vinculación causas ↔ medidas** (no solo “síntomas”).
- **Viabilidad** (técnica y económica) y **secuenciación**.
- **Claridad** de formatos y **trazabilidad** de decisiones (fotos, notas, cálculos).

**Anexo: Tabla de rangos orientativos para C y P (úselos como guía y documente el valor adoptado)**

la tabla muestra los rangos típicos de cobertura/uso del suelo, que son clave para determinar el impacto potencial de las actividades humanas sobre la erosión del suelo. Las coberturas como bosques densos o pastizales bien manejados tienen un rango de cobertura muy bajo, lo que ayuda a proteger el suelo, mientras que los cultivos anuales convencionales, que dejan el suelo expuesto, tienen un rango de cobertura significativamente más alto, aumentando el riesgo de erosión. Estos rangos permiten evaluar el efecto de distintas prácticas agrícolas y de manejo sobre la salud del suelo.

**Tabla 2.12: Rango Típico de Cobertura/Uso en Suelos**

| COBERTURA/USO (C)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | RANGO TÍPICO C |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| BOSQUE DENSO / PASTIZAL PERENNE BIEN MANEJADO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0.001–0.01     |
| CULTIVO PERENNE CON COBERTURA >70 %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 0.01–0.05      |
| CULTIVO ANUAL EN CONTORNO CON RESIDUOS >50 %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0.05–0.15      |
| CULTIVO ANUAL CONVENCIONAL, SUELO EXPUESTO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0.20–0.45      |
| <p>LA TABLA MUESTRA LOS RANGOS TÍPICOS DE PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN DEL SUELO (P), QUE SON FUNDAMENTALES PARA MITIGAR LA EROSIÓN Y PROMOVER LA SOSTENIBILIDAD AGRÍCOLA. LAS TERRAZAS DE BANCA BIEN DISEÑADAS Y LAS FAJAS EN CONTORNO CON BARRERAS VIVAS TIENEN UN IMPACTO POSITIVO EN LA PROTECCIÓN DEL SUELO, AL REDUCIR LA PENDIENTE Y EL FLUJO DE AGUA, MIENTRAS QUE LA LABRANZA EN CONTORNO SIN BARRERAS PUEDE SER MENOS EFECTIVA. LA FALTA DE PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN RESULTA EN UN ÍNDICE MÁXIMO, LO QUE REFLEJA UN ALTO RIESGO DE DEGRADACIÓN DEL SUELO. ESTOS RANGOS PROPORCIONAN UNA GUÍA PARA SELECCIONAR LAS MEJORES PRÁCTICAS SEGÚN LAS CONDICIONES LOCALES Y LOS OBJETIVOS DE MANEJO SOSTENIBLE.</p> <p>TABLA 2.13: RANGO TÍPICO DE PRÁCTICAS EN SUELOS</p> |                |

| PRÁCTICA (P)                                      | RANGO TÍPICO P |
|---------------------------------------------------|----------------|
| TERRAZAS DE BANCA BIEN DISEÑADAS                  | 0.10–0.30      |
| FAJAS EN CONTORNO Y BARRERAS VIVAS (PEND. 5–12 %) | 0.30–0.60      |
| LABRANZA EN CONTORNO (SIN BARRERAS)               | 0.55–0.90      |
| SIN PRÁCTICAS                                     | 1.00           |

**Nota:** Los valores son **orientativos**. Calibre con su realidad local y justifique por escrito las selecciones.

# CAPITULO III: FACTORES Y PROCESOS DE FORMACIÓN DEL SUELO

*Clasificación Genética de 1980 (Tercera Versión) y Nueva Versión 1995*

## I. Objetivo

Relacionar las características morfológicas y analíticas del perfil de suelo con los **procesos elementales de formación** y los **factores formadores** que los condicionan, para establecer su clasificación genética según la **Tercera Versión (1980)** y la **Nueva Versión de 1995** de la Clasificación Genética de los Suelos de Cuba, así como identificar las **limitantes agroproductivas** y las medidas de manejo más adecuadas.

## II. Fundamentos Teóricos

### 2.1 Factores formadores del suelo

Los suelos son el resultado de la acción combinada de los **factores formadores clásicos**:

**Clima, Organismos, Relieve, Material parental y Tiempo (CORPT)**, los cuales interactúan dinámicamente sobre la superficie terrestre modificando la roca madre.

- **Clima:** controla los procesos de meteorización, lixiviación y translocación; la temperatura regula la actividad biológica y la humedad determina la velocidad de los procesos de disolución y acumulación.
- **Organismos y vegetación:** aportan materia orgánica, promueven la formación de agregados estables y aceleran la ciclicidad biogeoquímica.
- **Relieve:** incide en la redistribución del agua, la erosión y el espesor del suelo. Las posiciones convexas favorecen la pérdida de materiales, mientras que las cóncavas promueven acumulación.
- **Material parental:** define la composición mineralógica inicial, el tipo de arcillas formadas y el régimen de bases intercambiables.
- **Tiempo:** permite que los procesos físicos, químicos y biológicos actúen sucesivamente, consolidando horizontes diagnósticos.

## 2.2 Procesos elementales de formación

Los procesos pedogenéticos, que son fundamentales para la formación y evolución de los suelos, se dividen en primarios (de meteorización y diferenciación inicial) y secundarios (de transformación y redistribución interna). En los climas tropicales con material calcáreo, diversos procesos juegan un papel crucial en la modificación de las características del suelo. Entre ellos, la calcificación y la descarbonatación son procesos clave que afectan el pH del suelo y la disponibilidad de nutrientes, mientras que la argilización y la ferruginización contribuyen a la estructura y composición mineral del suelo. Estos procesos, junto con la humificación y desilicación parcial, resultan en suelos más maduros y característicos de las regiones tropicales. La tabla a continuación resume estos procesos y sus efectos en el suelo.

**Tabla XXX: Procesos Pedogenéticos en Climas Tropicales con Material Calcáreo**

| TIPO DE PROCESO             | DESCRIPCIÓN Y EFECTO                                                                                                                    |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>CALCIFICACIÓN</b>        | Acumulación de carbonatos secundarios por evaporación o ascenso capilar; pH alcalino y efervescencia con HCl.                           |
| <b>DESCARBONATACIÓN</b>     | Disolución y lixiviación parcial de $\text{CaCO}_3$ ; genera pH neutro–ligeramente alcalino y cambios en color y estructura.            |
| <b>ARGILIZACIÓN</b>         | Formación de arcillas secundarias y migración de partículas finas entre horizontes; incremento del contenido de arcilla en el subsuelo. |
| <b>HUMIFICACIÓN</b>         | Acumulación de materia orgánica y formación del horizonte A oscuro, con estructura granular estable.                                    |
| <b>FERRUGINIZACIÓN</b>      | Oxidación y concentración relativa de $\text{Fe}^{3+}$ y $\text{Al}^{3+}$ en ambientes bien drenados.                                   |
| <b>DESILICACIÓN PARCIAL</b> | Relación $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ decreciente hacia el subsuelo; indicador de madurez pedogenética tropical.                 |

## 2.3. Caracterización morfológica del perfil

La caracterización morfológica del perfil del suelo es fundamental para comprender las propiedades físicas y químicas que afectan su aptitud

agrícola y ecológica. A continuación, se presenta una tabla que resume las observaciones de los horizontes de un perfil de suelo típico, especificando la profundidad, color según la escala Munsell, textura, estructura, reacción con HCl y observaciones adicionales. Estos detalles permiten interpretar las características clave del suelo, como la cantidad de materia orgánica, la presencia de raíces, y la influencia de la caliza o carbonatos en los horizontes más profundos.

**Tabla XXX: Caracterización Morfológica del Perfil del Suelo**

| HORIZONTE  | PRO F. (CM) | COLOR (MUNSELL)                | TEXTURA          | ESTRUCTURA    | REACCIÓN HCL | OBSERVACIONES                     |
|------------|-------------|--------------------------------|------------------|---------------|--------------|-----------------------------------|
| <b>A1</b>  | 0–20        | 7.5 YR 3/3 pardo oscuro        | Arcillosa        | Granular      | Ligera       | Alta M.O., raíces abundantes      |
| <b>(B)</b> | 20–34       | 10 YR 5/2 pardo grisáceo       | Arcillosa        | Poliéd. media | Ligera       | Transición clara, raíces escasas  |
| <b>BC</b>  | 34–44       | 10 YR 6/4 pardo grisáceo claro | Arcillosa        | Poco definida | Fuerte       | Transición neta, color más claro  |
| <b>C</b>   | 44–65+      | Gris parduzco claro            | Arcilla calcárea | Masiva        | Fuerte       | Manchas blanquecinas de carbonato |

### III. Interpretación del perfil

#### Factores formadores predominantes

- **Clima tropical subhúmedo** (precipitación ~1400 mm) → alternancia de lixiviación y acumulación.
- **Relieve ligeramente ondulado (4–5 %)** → drenaje moderado y escaso lavado de bases.
- **Material parental calcáreo** → carbonatos en todo el perfil, pH neutro–alcalino.

- **Vegetación boscosa tropical** → elevada aportación de humus en horizonte superficial.

### Procesos dominantes

- Principal: *Calcificación–descarbonatación alternante*, evidenciada por efervescencia al HCl, pH 6.6–7.0 y acumulación de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  en B y BC.
- Secundarios: *Argilización moderada* (incremento de arcilla de 38,4 % a 41,6 % en profundidad) y *humificación superficial*.

### Indicadores analíticos

- pH casi neutro (6,6–7,0).
- Contenido de  $\text{CaCO}_3$  libre creciente con la profundidad.
- C.I.C. alta (58–47 mmol·100g<sup>-1</sup>) → presencia de arcillas 2:1 tipo esmectita o illita.
- Relación  $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3 \approx 2,3\text{--}2,5$  → suelo moderadamente desilicatado.
- Valor V (bases/CEC) > 80 % → suelo eutrófico.

## IV. Clasificación del suelo

### 4.1 Según la Tercera Versión (1980)

- **Tipo:** Fersialítico pardo (por la presencia de Fe y Al libres moderados, textura arcillosa y tonalidad parda).
- **Subtipo:** Fersialítico pardo cálcico (reacción al HCl en todo el perfil y materiales calcáreos).
- **Variedad:** Fersialítico pardo cálcico **poco evolucionado** (perfil A–B–C con diferenciación incipiente).

### 4.2 Según la Nueva Versión (1995)

- **Grupo:** Fersialíticos.
- **Subgrupo:** Cálcico, por presencia de carbonatos secundarios.
- **Subtipo:** Fersialítico cálcico típico (estructura moderadamente desarrollada, C cálcico).
- **Horizonte diagnóstico principal:** B fersialítico (argilización parcial + acumulación de Fe–Al).

## V. Limitantes agroproductivas detectadas

La identificación de limitantes agroproductivas es crucial para entender cómo las propiedades del suelo afectan la productividad agrícola. A continuación, se presentan las principales limitantes detectadas en el perfil

del suelo, con sus respectivas evidencias y efectos potenciales sobre los cultivos. Estas limitantes incluyen aspectos como la textura del suelo, la presencia de carbonatos, la compactación, y la retención hídrica, los cuales requieren atención para optimizar el manejo del suelo y evitar impactos negativos en la productividad.

**Tabla 5.1: Limitantes Agroproductivas Detectadas en el Perfil del Suelo**

| TIPO DE LIMITANTE                  | EVIDENCIA                                          | EFEECTO POTENCIAL                       |
|------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| <b>TEXTURAL<br/>(ARCILLOSA)</b>    | Arcilla 38–41 %                                    | Drenaje lento, aireación reducida       |
| <b>CARBONATADA</b>                 | Reacción al HCl, pH 6.6–7.0                        | Bloqueo de micronutrientes (Fe, Zn, Mn) |
| <b>COMPACTACIÓN<br/>INCIPIENTE</b> | Estructura poliédrica y densidad aparente ↑ en (B) | Limitación radicular                    |
| <b>RETENCIÓN HÍDRICA<br/>ALTA</b>  | Cap. campo 35 %, coef. marchitez 18 %              | Riesgo de saturación temporal           |

## VI. Recomendaciones técnicas de manejo

### Conservación de estructura y aireación

- Labranza mínima o subsolado selectivo en época seca.
- Evitar tránsito mecanizado en condiciones de alta humedad.

### Corrección de deficiencias nutricionales

- Aplicar quelatos de Fe y Zn o compost enriquecido.
- Incorporar materia orgánica (3–5 t·ha<sup>-1</sup>) para mejorar agregación y liberar nutrientes.

### Manejo hídrico

- Surcos o drenaje superficial leve para evacuar excesos.
- Mantener cobertura vegetal permanente.

### Uso agrícola recomendado

- Cultivos moderadamente exigentes (maíz, yuca, maní, pastos mejorados).

- Evitar hortalizas sensibles a exceso de  $\text{CaCO}_3$  o saturación hídrica ( $\text{pH} > 7,0$ ).

## VII. Guía de análisis para los ejercicios de la clase

1. **Factores formadores:** fundamente el rol dominante de clima y material parental calcáreo.
2. **Procesos pedogenéticos:** explique la alternancia calcificación–descarbonatación y la argilización.
3. **Clasificación genética 1980:** tipo, subtipo y variedad.
4. **Clasificación 1995:** grupo y subtipo, señalando el horizonte diagnóstico.
5. **Limitantes:** jerarquice textural, calcárea y estructural.
6. **Manejo:** diseñe plan integrado (físico–químico–biológico) según intensidad de limitantes.

# **CAPÍTULO IV: Utilización de los mapas de suelos y las clasificaciones agroproductiva y agrológica para establecer la recomendación de uso y manejo en los suelos del Ecuador**

## **1. Introducción**

El suelo constituye el fundamento de la productividad agrícola, la estabilidad ecológica y la sostenibilidad territorial. En Ecuador, un país de contrastes geográficos y climáticos, la diversidad edáfica es resultado de la interacción de múltiples factores formadores —clima, relieve, material parental, vegetación y tiempo— que generan una gran variedad de tipos de suelos. El conocimiento detallado de esta diversidad, expresado a través de los **mapas edafológicos, agroproductivos y agrológicos**, permite orientar de manera racional las decisiones sobre uso del suelo, manejo agrícola y planificación territorial.

La interpretación adecuada de estas herramientas cartográficas no solo evita la degradación y pérdida de fertilidad, sino que además optimiza la selección de cultivos, la conservación de ecosistemas y la gestión del recurso hídrico.

El presente capítulo aborda los fundamentos teóricos y prácticos del uso de los mapas de suelos y las clasificaciones agroproductiva y agrológica, aplicados al contexto ecuatoriano. Se presentan los criterios de interpretación, las categorías oficiales y ejemplos de aplicación en las diferentes regiones naturales del país.

## **2. Fundamentos teóricos de la cartografía de suelos en Ecuador**

La **cartografía edafológica** tiene como propósito representar la distribución espacial de los tipos de suelo y sus propiedades físicas, químicas e hidrológicas. En Ecuador, el **Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG)**, en conjunto con el **Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP)** y universidades públicas, ha desarrollado mapas edafológicos a escala 1:25 000 y 1:50 000 que describen las unidades de suelo mediante clasificaciones taxonómicas adaptadas a las condiciones tropicales y andinas.

Cada mapa contiene información georreferenciada que permite interpretar variables esenciales como:

- Textura, estructura y profundidad efectiva del suelo.
- Capacidad de retención de humedad y drenaje.
- pH, salinidad, sodicidad y contenido de materia orgánica.

- Grado de erosión y pendiente.

Estas variables se integran para establecer categorías de **aptitud agroproductiva y clases agrológicas**, las cuales son herramientas clave en la planificación del uso sostenible del territorio.

### **3. Clasificación agroproductiva en el contexto ecuatoriano**

La **clasificación agroproductiva** tiene como finalidad determinar el potencial productivo del suelo en función de su capacidad para sostener diferentes cultivos bajo condiciones naturales o con manejo técnico razonable. En Ecuador, el **MAG** y el **Plan Nacional de Ordenamiento Territorial Agropecuario (PNOT, 2018)** adoptan un sistema de **cuatro clases agroproductivas**, derivado de evaluaciones de fertilidad, drenaje, pendiente y textura, entre otros parámetros.

La clasificación agroproductiva es un instrumento fundamental para determinar la capacidad de los suelos ecuatorianos en función de su rendimiento potencial para sustentar cultivos. Esta clasificación, adoptada por el MAG y el Plan Nacional de Ordenamiento Territorial Agropecuario (PNOT, 2018), se basa en evaluaciones detalladas de características del suelo como fertilidad, drenaje, pendiente y textura. A continuación, se presenta la categorización de los suelos según su capacidad productiva, desde los más aptos para la agricultura sin limitantes significativas hasta aquellos con restricciones severas que limitan su uso agrícola.

**Tabla XXX : Clasificación Agroproductiva en el Contexto Ecuatoriano**

| CATEGORÍA AGROPRODUCTIVA | EVALUACIÓN          | RENDIMIENTO POTENCIAL VARIETAL (%) | INTERPRETACIÓN GENERAL              |
|--------------------------|---------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| I                        | Muy productivo      | 70 – 100                           | Apto sin limitantes significativas. |
| II                       | Productivo          | 50 – 70                            | Apto con limitaciones moderadas.    |
| III                      | Poco productivo     | 30 – 50                            | Apto con limitaciones severas.      |
| IV                       | Muy poco productivo | < 30                               | Inapropiado o de uso restringido.   |

Estas categorías orientan la zonificación de cultivos según sus requerimientos fisiológicos y ecológicos.

Por ejemplo:

- En la **Costa**, los suelos franco-arenosos y bien drenados se destinan al banano, cacao y maíz.
- En la **Sierra**, los suelos volcánicos andisoles muestran alta productividad para tubérculos y hortalizas.
- En la **Amazonía**, los suelos ácidos y de baja saturación de bases limitan los cultivos intensivos, siendo más aptos para sistemas agroforestales.
- En **Galápagos**, la escasa profundidad y alta pedregosidad restringen la agricultura a áreas reducidas con control ambiental.

#### **4. Clasificación agrológica y su aplicación en el uso del suelo**

La clasificación agrológica es una herramienta clave para determinar el uso adecuado de los suelos, considerando las limitantes que pueden ser permanentes o temporales. Esta clasificación agrupa los suelos según su aptitud para soportar actividades agrícolas, ganaderas o de reforestación. En el contexto ecuatoriano, la clasificación agrológica se utiliza para definir el manejo más adecuado de los suelos en función de las características específicas de cada clase y las limitaciones que puedan afectar su rendimiento productivo. A continuación, se presenta un resumen de las ocho clases agrológicas reconocidas en el país y su uso potencial.

**Tabla 7.1: Clasificación Agrológica y su Aplicación en el Uso del Suelo**

| CLASE AGROLÓGICA | USO POTENCIAL                 | LIMITANTES PRINCIPALES                  |
|------------------|-------------------------------|-----------------------------------------|
| I                | Agricultura intensiva         | Ninguna o mínima.                       |
| II               | Agricultura en rotación       | Ligeras limitaciones.                   |
| III              | Agricultura moderada          | Pendiente, drenaje o fertilidad media.  |
| IV               | Agricultura limitada          | Riesgo de erosión o escasa profundidad. |
| V                | Pastos permanentes            | Laboreo no recomendable.                |
| VI               | Vegetación permanente         | Pendientes fuertes, erosión severa.     |
| VII              | Forestal o silvopastoril      | Alta fragilidad ecológica.              |
| VIII             | Conservación o vida silvestre | Inapropiado para agricultura.           |

Estas clases se establecen mediante el análisis integrado de relieve, textura, drenaje, profundidad, erosión y pedregosidad.

Por ejemplo, un suelo franco-arcilloso, con pendiente del 8 % y moderada erosión, se clasificaría como **Clase IV**, recomendándose un manejo agroforestal o rotaciones con pastos.

## 5. Metodología de interpretación de los mapas de suelos

El proceso técnico para interpretar mapas edafológicos y derivar recomendaciones de manejo incluye las siguientes etapas:

1. **Identificación de la unidad de suelo:** según su clave edáfica o tipo genético (Fersialítico, Pardo, Andosol, Vertisol, etc.).
2. **Análisis de factores limitantes:** acidez, salinidad, compactación, drenaje deficiente o baja retención hídrica.
3. **Determinación de la categoría agroproductiva:** en función del rendimiento esperado y las propiedades del suelo.

4. **Asignación de la clase agrológica:** según la capacidad de uso sostenible.
5. **Emisión de recomendaciones de manejo:** considerando rotación de cultivos, labranza conservacionista, fertilización orgánica, drenaje o control de erosión.

## 6. Ejemplo aplicado: Zona costera de Manabí

En la parroquia Jipijapa, ubicada en la zona costera de Manabí, se han identificado tres unidades edáficas predominantes, cada una con características específicas que condicionan su uso y manejo agrícola. Estas unidades han sido clasificadas según su tipo genético, pendiente, clase agrológica y las recomendaciones correspondientes para optimizar su uso. El siguiente ejemplo muestra cómo la información edáfica y la clasificación agrológica se integran para establecer estrategias de manejo adecuadas a las condiciones locales, destacando la importancia de la cartografía de suelos en la planificación productiva.

**Tabla XX.** Unidades edáficas y recomendaciones para el manejo agrícola en la parroquia Jipijapa

| UNIDAD DE SUELO | TIPO GENÉTICO                    | PENDIENTE (%) | CLASE AGROLÓGICA | RECOMENDACIONES                                       |
|-----------------|----------------------------------|---------------|------------------|-------------------------------------------------------|
| U1              | Fersialítico pardo rojizo típico | 3–5           | II               | Rotación maíz–soya–pastos; labranza mínima.           |
| U2              | Pardo con carbonatos             | 6–12          | IV               | Cultivos permanentes; evitar laboreo en época húmeda. |
| U3              | Gley húmico                      | < 2           | V                | Pastos de inundación; drenaje superficial.            |

Este ejemplo muestra la utilidad práctica de la cartografía de suelos para vincular la información analítica con la planificación productiva.

## 7. Recomendaciones generales de manejo sostenible

- Aplicar **labranza conservacionista** para reducir la compactación y la erosión.
- Implementar **rotaciones con leguminosas** que mejoren la estructura del suelo y el contenido de materia orgánica.

- Establecer **barreras vivas y terrazas** en pendientes mayores al 8 %.
- Monitorear el **pH y la salinidad** en zonas costeras para prevenir degradación química.
- Priorizar **agroforestería y sistemas silvopastoriles** en suelos de clases VI y VII.
- Promover la **cartografía digital participativa**, integrando SIG y drones para actualización de los mapas edáficos nacionales.

## 8. Conclusiones

La utilización de los mapas de suelos y de las clasificaciones agroproductiva y agrológica en Ecuador constituye una herramienta esencial para la gestión sostenible del territorio. Su correcta interpretación permite armonizar la producción agropecuaria con la conservación ambiental, optimizar el rendimiento de los cultivos y mitigar los riesgos de erosión y degradación. En este contexto, la formación de profesionales capaces de leer e interpretar la información edafológica se convierte en un componente estratégico del desarrollo rural sostenible y de la seguridad alimentaria nacional.

# **CAPITULO V: GÉNESIS Y CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS DEL ECUADOR**

## **1. OBJETIVO DEL CAPÍTULO:**

Este capítulo tiene como objetivo proporcionar una visión integral de los suelos del Ecuador a través de su génesis y clasificación, con un enfoque en la descripción, caracterización y clasificación de los suelos en condiciones de campo. Se busca identificar los procesos formadores que influyen en las propiedades edáficas, así como establecer criterios técnicos para su manejo sostenible, conservación y uso eficiente en los diferentes contextos agroproductivos y ambientales del país.

## **2. Descripción, caracterización y clasificación de los suelos en condiciones de campo**

### **2.1 Introducción**

La descripción y caracterización de los suelos en condiciones de campo constituye una de las etapas fundamentales en los estudios edafológicos, pues permite identificar las propiedades morfológicas, físicas, químicas e hidrofísicas que determinan su génesis, evolución y potencial productivo. En el contexto ecuatoriano, donde la diversidad fisiográfica y climática es excepcional, los suelos reflejan una amplia gama de procesos formadores y características derivadas de los materiales parentales volcánicos, aluviales, metamórficos y sedimentarios.

- Realizar una **caracterización de campo rigurosa** es indispensable para:
- Comprender los procesos de formación dominantes.
- Determinar las limitantes agroproductivas.
- Clasificar los suelos conforme a los sistemas nacionales e internacionales (FAO, WRB, INIAP-MAG).
- Formular recomendaciones de uso y manejo sostenible.

## **3. Fundamentos teóricos de la descripción de suelos**

La descripción de un perfil de suelo es un proceso esencial en la edafología, ya que permite identificar las características que definen su génesis y evolución. Cada propiedad del suelo, como el color, textura, estructura o consistencia, proporciona información valiosa sobre los procesos pedogenéticos que han influido en su formación y sobre las condiciones que determinan su potencial agrícola. Estas observaciones no solo contribuyen al

entendimiento de la morfología del suelo, sino también a su clasificación genética y agrológica, lo cual es fundamental para la toma de decisiones sobre su uso y manejo adecuado. En la siguiente tabla se resumen las principales propiedades que deben registrarse durante la descripción de un perfil de suelo, así como su significado e interpretación.

**Tabla XX.** Características y significados de las propiedades observadas en la descripción de perfiles de suelo

| PROPIEDAD                       | DESCRIPCIÓN Y SIGNIFICADO                                                                         |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>COLOR</b>                    | Se determina con la carta de Munsell; indica contenido de materia orgánica, humedad y oxidación.  |
| <b>TEXTURA</b>                  | Relación porcentual entre arena, limo y arcilla; refleja la permeabilidad y la retención de agua. |
| <b>ESTRUCTURA</b>               | Forma, tamaño y grado de agregación de las partículas; influye en la aireación y la infiltración. |
| <b>CONSISTENCIA</b>             | Comportamiento del suelo ante la presión o humedad (friable, plástica, pegajosa).                 |
| <b>PROFUNDIDAD EFECTIVA</b>     | Espesor útil para el desarrollo radicular.                                                        |
| <b>PEDREGOSIDAD Y ROCOSIDAD</b> | Limitan el laboreo y la capacidad de retención de agua.                                           |
| <b>REACCIÓN AL HCL</b>          | Indica presencia de carbonatos y el grado de calcarificación.                                     |
| <b>RAÍCES Y BIOTURBACIÓN</b>    | Muestran la actividad biológica y el potencial de aireación.                                      |
| <b>HUMEDAD Y DRENAJE</b>        | Permiten evaluar el régimen hídrico y posibles condiciones de anegamiento.                        |

Cada característica observada se asocia con los procesos de formación (eluviales, iluviales, ferruginosos, humificación, gleización, entre otros), los cuales orientan la clasificación genética y agrológica del suelo.

## 4. Factores formadores de los suelos del Ecuador

Los suelos del Ecuador son el resultado de la interacción dinámica de **cinco factores formadores** (Jenny, 1941), cuya acción conjunta define las propiedades observadas en el campo:

### **Clima:**

- En la Costa, el régimen tropical húmedo origina suelos aluviales y gleysosos.
- En la Sierra, las oscilaciones térmicas y la ceniza volcánica favorecen la formación de Andisoles fértiles.
- En la Amazonía, la alta pluviosidad genera suelos lixiviados y ácidos (**Ultisoles, Acrisoles**).

### **Relieve:**

Determina el drenaje y la erosión. Las pendientes pronunciadas promueven la formación de suelos delgados y poco evolucionados (Entisoles, Inceptisoles).

### **Material parental:**

Varía desde cenizas volcánicas, basaltos, calizas y esquistos hasta depósitos aluviales, influyendo directamente en la textura y la mineralogía.

### **Vegetación:**

Aporta materia orgánica y regula la estabilidad estructural. En los Andes, los pastizales de altura generan horizontes A ricos en humus; en la Amazonía, la descomposición rápida limita su acumulación.

### **Tiempo:**

Define el grado de desarrollo del suelo. Los más antiguos muestran horizontes bien diferenciados (Bt, Bs), mientras los jóvenes carecen de ellos.

## 3. Metodología de descripción y muestreo de perfiles

Para realizar una caracterización de suelos en condiciones de campo se siguen los pasos metodológicos establecidos por el **MAG e INIAP**:

### 3.1 Selección del sitio

- Escoger un terreno representativo de la unidad fisiográfica.
- Evitar áreas alteradas por laboreo, relleno o erosión reciente.

### 3.2 Excavación del perfil

- Abrir una calicata de 1.5 a 2.0 m de profundidad o hasta alcanzar el material parental.
- Limpiar cuidadosamente la pared de observación.

### 3.3 Descripción morfológica

Registrar para cada horizonte:

- **Profundidad y límites.**
- **Color (en seco y húmedo).**
- **Estructura y consistencia.**
- **Reacción al HCl y presencia de carbonatos.**
- **Contenido de raíces, concreciones, manchas o moteados.**

### 3.4 Muestreo y análisis

Extraer muestras representativas (500 g a 1 kg) por horizonte para análisis fisicoquímico en laboratorio:

- Textura, densidad aparente y real.
- pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC).
- Materia orgánica, bases intercambiables y salinidad.
- Capacidad de campo y punto de marchitez.

## 4. Clasificación de los suelos en el Ecuador

Ecuador adopta sistemas de clasificación integrados, combinando la **Clasificación Genética de Cuba (1980–2008)** para estudios docentes y la **World Reference Base for Soil Resources (WRB, FAO 2022)** en proyectos nacionales e internacionales.

Ambos sistemas permiten identificar los tipos genéticos dominantes en las tres regiones continentales del país.

### 4.1 Tipos genéticos predominantes

La diversidad de suelos en Ecuador está directamente relacionada con su variabilidad climática y fisiográfica. Cada región del país presenta características edáficas particulares que determinan los tipos genéticos predominantes en suelos, los cuales son influenciados por factores como el material parental, el clima y la vegetación. La siguiente tabla muestra los tipos genéticos más representativos de cada región, así como sus principales características y ejemplos de localización, proporcionando información clave

para entender los suelos y sus capacidades productivas en diferentes contextos geográficos.

**Tabla XXX.** Tipos genéticos predominantes en el Ecuador

| REGIÓN                     | TIPO GENÉTICO PREDOMINANTE            | EJEMPLO DE LOCALIZACIÓN         | CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES                                               |
|----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| <b>COSTA</b>               | Fersialíticos y Pardos con carbonatos | Manabí, Los Ríos                | Textura franco-arcillosa, buen drenaje, moderada fertilidad natural.      |
| <b>SIERRA</b>              | Andisoles y Húmicos volcánicos        | Pichincha, Chimborazo, Cotopaxi | Alta CIC, textura ligera, elevada retención de agua y materia orgánica.   |
| <b>AMAZONÍA</b>            | Acrisoles, Ferralsoles, Gleysoles     | Pastaza, Orellana               | Ácidos, lixiviados, baja saturación de bases, drenaje deficiente.         |
| <b>INSULAR (GALÁPAGOS)</b> | Litosoles y suelos jóvenes basálticos | Isabela, Santa Cruz             | Poco profundos, pedregosos, medianamente fértiles por cenizas volcánicas. |

## 4.2 Clasificación agrológica

De acuerdo con la capacidad de uso, se agrupan en ocho clases (I–VIII), como se detalla en el capítulo anterior, sirviendo de base para definir el **uso agrícola, forestal o de conservación**.

## 5. Ejemplo aplicado: Perfil típico de un suelo Andino (Andisol)

- **Ubicación:** Cantón Cotopaxi, 2 900 m s.n.m.
- **Clima:** Templado-húmedo (1 200 mm anuales).
- **Relieve:** Ondulado (5–8 %).
- **Material parental:** Cenizas volcánicas.
- **Vegetación original:** Bosque húmedo montano.

**Descripción del perfil:**

La siguiente tabla presenta la descripción morfológica de un perfil típico de suelo andino, destacando sus horizontes, características físicas y reacciones frente a agentes como el ácido clorhídrico (HCl). Esta información es esencial para evaluar la fertilidad y el potencial de uso agrícola de los suelos en las zonas altas del Ecuador, especialmente en regiones volcánicas, donde los suelos muestran una gran capacidad de retención de agua y materia orgánica. Los datos proporcionados permiten realizar un análisis detallado sobre el comportamiento del suelo y su clasificación.

**Tabla XX:**  
Características morfológicas de un perfil típico de suelo Andino

| HORIZONTE | PROFUNDIDAD (CM) | COLOR (HÚMEDO)               | ESTRUCTURA        | CONSISTENCIA | REACCIÓN HCL | OBSERVACIONES                                |
|-----------|------------------|------------------------------|-------------------|--------------|--------------|----------------------------------------------|
| <b>A1</b> | 0–25             | 10YR 2/1 (negro)             | Granular fina     | Muy friable  | Negativa     | Alta materia orgánica.                       |
| <b>A2</b> | 25–45            | 10YR 3/2 (pardo oscuro)      | Subangular media  | Friable      | Negativa     | Raíces finas abundantes.                     |
| <b>BW</b> | 45–85            | 10YR 4/3 (pardo amarillento) | Subangular gruesa | Firme        | Negativa     | Evidencia de acumulación de Fe y Al amorfos. |
| <b>C</b>  | 85–120+          | 10YR 5/4 (pardo claro)       | Masiva            | Suelta       | Negativa     | Material parental volcánico.                 |

**Interpretación:**

- Suelo joven, bien drenado, con horizonte A espeso y alta actividad biológica.
- Alta capacidad de intercambio catiónico y retención hídrica.
- Clasificación genética: Húmico volcánico típico (Andisol).
- Clase agrológica: II (apto para agricultura intensiva con manejo conservacionista).

- Recomendaciones: Labranza mínima, rotaciones con leguminosas, terrazas de absorción.

## **6. Recomendaciones generales para la caracterización de campo**

1. Utilizar fichas normalizadas del MAG o FAO para la descripción de perfiles.
2. Acompañar los registros con fotografías georreferenciadas.
3. Registrar coordenadas UTM y altitud del sitio.
4. Correlacionar los resultados de campo con los análisis de laboratorio.
5. Incluir observaciones de erosión, drenaje y uso actual del terreno.
6. Clasificar el suelo de acuerdo con el sistema WRB o el esquema genético nacional.

## **7. Conclusiones**

La caracterización y clasificación de los suelos del Ecuador en condiciones de campo es una práctica esencial para comprender la diversidad edáfica del país y promover un manejo racional de los recursos. Los suelos ecuatorianos presentan una notable variabilidad vinculada a la geodinámica andina y a la influencia climática zonal, lo cual exige metodologías de campo rigurosas y criterios taxonómicos integrados. Su adecuada descripción permite formular estrategias de uso sostenible, conservación y restauración, fundamentales para la seguridad alimentaria y la resiliencia ambiental del territorio nacional.

## **Taller integrador del Tema II**

### **I. OBJETIVO GENERAL**

Integrar los conocimientos teóricos y prácticos sobre los procesos de formación, descripción, caracterización y clasificación de los suelos del Ecuador, aplicando metodologías de análisis morfológico, taxonómico y de capacidad de uso, con el fin de formular recomendaciones de manejo y uso sostenible en función de su génesis y características edáficas.

### **II. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Interpretar las propiedades morfológicas, físicas y químicas de perfiles de suelos ecuatorianos representativos de diferentes regiones fisiográficas.

- Identificar los procesos elementales de formación y los factores que determinan la evolución de los suelos.
- Clasificar los suelos bajo estudio según la **Clasificación Genética (versión 2008)** y el sistema **WRB-FAO (2022)**.
- Evaluar las limitantes agroproductivas derivadas de las condiciones morfológicas y taxonómicas observadas.
- Proponer medidas de uso y manejo sostenible acordes a las condiciones agroecológicas y de conservación del recurso suelo.

### III. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La clasificación de los suelos ecuatorianos requiere integrar la **observación de campo** con la **interpretación analítica y taxonómica**. Cada perfil de suelo es la expresión de los **factores formadores** (clima, relieve, material parental, vegetación y tiempo), y los **procesos pedogenéticos** que han actuado sobre él, tales como:

- **Humificación y mineralización**, que determinan el contenido de materia orgánica.
- **Lixiviación y eluviación**, responsables de la pérdida de bases y el desarrollo de horizontes ácidos.
- **Iliviación y ferruginización**, que originan acumulaciones de arcilla, hierro y aluminio.
- **Calcificación y gleyzación**, comunes en suelos de la Costa y zonas bajas.

El reconocimiento de estos procesos en campo permite establecer las **relaciones entre génesis, morfología y uso**, fundamentales para definir estrategias de manejo sostenible.

### IV. MATERIALES Y EQUIPO NECESARIO

- Mapa provincial de suelos (escala 1:25 000 o 1:50 000).
- Fichas de descripción morfológica de perfiles.
- Carta de colores Munsell.
- GPS o dispositivo móvil con coordenadas UTM.
- HCl al 10% para pruebas de carbonatos.
- Cinta métrica, pala, cuchillo de perfil y brújula.
- Guía de clasificación genética (1980–2008) y sistema WRB (FAO, 2022).
- Calculadora y computadora para análisis de datos.

## V. METODOLOGÍA DE TRABAJO

El taller integrador combina **actividades de campo, gabinete y análisis interpretativo**, distribuidas en tres fases:

### 1. Fase de campo: descripción y muestreo

- Apertura de una calicata representativa (1.5 m mínimo o hasta el material parental).
- Descripción morfológica detallada de cada horizonte: color, estructura, textura, consistencia, raíces, carbonatos, pedregosidad, moteados, etc.
- Registro fotográfico y georreferenciado del perfil.
- Extracción de muestras compuestas para análisis fisicoquímico.

### 2. Fase de gabinete: procesamiento y clasificación

- Determinación de propiedades físicas (textura, densidad aparente y real, porosidad).
- Análisis químicos: pH, MO, bases intercambiables, CIC, salinidad, carbonatos.
- Clasificación taxonómica según:
  - a) Clasificación Genética de los Suelos de Cuba (2008) — utilizada tradicionalmente en América Latina.
  - b) World Reference Base for Soil Resources (WRB, FAO 2022) — referencia internacional adoptada en Ecuador.

### 3. Fase interpretativa: análisis y recomendaciones

- Correlación entre características observadas y procesos pedogenéticos.
- Identificación de limitantes agroproductivas.
- Asignación de la Clase Agrológica (I–VIII) y categoría de aptitud agroproductiva.
- Elaboración de conclusiones y propuestas de manejo sostenible.

## VI. EJERCICIOS A DESARROLLAR

1. **Análisis de los factores formadores:** Identifique los factores predominantes en el área de estudio (clima, relieve, material parental, vegetación, tiempo).  
Ejemplo: En un suelo andino derivado de ceniza volcánica → clima templado húmedo, relieve ondulado, material parental volcánico, vegetación original de bosque montano.

2. **Identificación de procesos de formación:** Determine los procesos elementales observados en el perfil (humificación, lixiviación, ferruginización, gleyzación, etc.) y relacione cada uno con las propiedades descritas.
3. **Descripción morfológica del perfil:** Complete una ficha como la siguiente:

**Tabla xxxx: Descripción morfológica del perfil de suelo (ejemplo típico)**

| HORIZONTE | PROFUNDIDAD (CM) | COLO R (MUNSELL) | TEXTURA           | ESTRUCTURA       | CONSISTENCIA | REACCIÓN HCL    | OBSERVACIONES                 |
|-----------|------------------|------------------|-------------------|------------------|--------------|-----------------|-------------------------------|
| <b>A1</b> | 0–25             | 10YR 3/2         | Franc o-arcillosa | Granular         | Friable      | Negativa        | Raíces finas abundantes       |
| <b>B1</b> | 25–60            | 10YR 4/3         | Arcillosa         | Subangular media | Firme        | Positiva débil  | Presencia de moteados rojizos |
| <b>C</b>  | 60–120           | 10YR 6/4         | Franc o arenosa   | Masiva           | Suelta       | Positiva fuerte | Material parental calcáreo    |

**Clasificación genética y WRB:**

- Según la versión 2008 → Fersialítico pardo rojizo típico, sobre caliza suave, carbonatado lavado.
- Según WRB → *Calcic Luvisol (Loamic, Eutric, Hypereutric)*.

**Determinación de la Clase Agrológica y Aptitud Agroproductiva:**

**Tabla xxx:** Clasificación de la capacidad de uso del suelo y recomendaciones generales

| CLASE | CAPACIDAD DE USO | RECOMENDACIÓN GENERAL                              |
|-------|------------------|----------------------------------------------------|
| II    | Alta             | Agricultura intensiva con manejo conservacionista. |
| IV    | Moderada         | Cultivos permanentes o sistemas agroforestales.    |
| VI    | Limitada         | Vegetación permanente o pastoreo controlado.       |

**Elaboración de recomendaciones técnicas:**

- Control de erosión mediante terrazas y cobertura vegetal.
- Aumento de materia orgánica mediante compost y abonos verdes.
- Uso de labranza mínima y drenaje adecuado.
- Adaptación del cultivo al tipo de suelo (rotaciones con leguminosas, uso de especies tolerantes).

**Informe final del taller:**

Cada grupo elaborará un informe que incluya:

- Descripción morfológica completa del perfil.
- Clasificación genética y WRB.
- Identificación de limitantes físicas y químicas.
- Evaluación de clase agrológica.
- Propuestas de manejo y conservación.

## VII. EJEMPLO APLICADO (CASO DE CAMPO)

- **Ubicación:** Valle del Chota, provincia de Imbabura
- **Altitud:** 1 700 m s.n.m.
- **Clima:** Semiárido cálido (700 mm/año)
- **Material parental:** Sedimentos aluviales con carbonatos
- **Vegetación original:** Arbustos xerofíticos

**Resultado del análisis:**

- pH = 7.8; MO = 1.5 %; CIC = 12 cmol/kg;
- Textura franco-arenosa; densidad aparente = 1.55 g/cm<sup>3</sup>;
- **Daños de compactación superficial y baja retención hídrica.**

**Interpretación:**

- Tipo genético: *Pardo con carbonatos típico*.
- WRB: *Calcic Cambisol (Arenic, Eutric)*.
- Clase agrológica: IV (limitada).
- Limitantes: baja fertilidad, riesgo de erosión e insuficiente retención de agua.

**Recomendaciones:**

- Incorporar materia orgánica y prácticas de labranza mínima.
- Emplear riego localizado.
- Promover cultivos tolerantes a sequía (moringa, maní forrajero).
- Implementar terrazas de contorno y cobertura vegetal permanente.

## VIII. CONCLUSIONES

El **taller integrador del Tema II** permite aplicar de forma práctica los principios de la edafología en contextos reales del Ecuador, consolidando la comprensión del suelo como un sistema natural complejo. El enfoque integral —desde la descripción morfológica hasta la clasificación y las recomendaciones de manejo— promueve la formación de competencias técnicas en diagnóstico, evaluación y gestión sostenible del recurso suelo, fundamentales para el futuro profesional en ciencias agrarias y ambientales.

## Valoración de formas predominantes, pérdidas, carencias y excesos

### 1. Marco Teórico: Elementos Esenciales

La nutrición vegetal en los sistemas agrícolas modernos exige una comprensión integrada de las formas en que los elementos esenciales están presentes en el suelo, cómo se pierden, cuándo adquieren deficiencias o excesos, y cómo estas condiciones dependen de las características del perfil del suelo. A continuación, se desarrollan los principales aspectos.

#### 1.1 Concepto de elemento esencial y categorías

Se considera un elemento como esencial cuando la planta no puede completar su ciclo vital sin él, no puede ser sustituido por otro elemento y

está directamente involucrado en su metabolismo. Los nutrientes vegetales se clasifican en:

- **Macronutrientes primarios:** N, P, K.
- **Macronutrientes secundarios:** Ca, Mg, S.
- **Micronutrientes:** Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl, Ni, entre otros. El enfoque actual destaca que no solo la cantidad importa sino también la **forma química**, la **disponibilidad** y la **relación entre elementos**.

## 1.2 Disponibilidad en el suelo: formas químicas y dinámicas

- Los elementos esenciales tienen diferentes “reservas” o “formas” en el suelo: solución, intercambio, mineral, orgánica.
- La fracción de solución es la más inmediatamente disponible pero también la más dinámica.
- La fracción intercambiable (en la CEC) sirve como reserva amortiguadora.
- Las formas minerales y orgánicas requieren procesos de liberación (meteorización, mineralización) para volverse disponibles. El pH del suelo, la textura, la materia orgánica y la estructura influyen decisivamente en esa disponibilidad.

## 1.3 Pérdidas, carencias y excesos

- **Pérdidas:** lixiviación (sobre todo en suelos arenosos o con alta infiltración), volatilización (por ejemplo, N en suelos alcalinos), desnitrificación (en condiciones anaeróbicas), fijación (por ejemplo, P o K en ciertos tipos de arcillas).
- **Carencias:** se producen cuando la disponibilidad del nutriente es menor que la demanda del cultivo; pueden manifestarse aún si el contenido total es alto, debido a forma no disponible o desequilibrios.
- **Excesos:** un nutriente en exceso puede alterar la absorción de otros, provocar toxicidad o degradación de la estructura del suelo. Esta interacción entre nutrientes es más reconocida actualmente. Por ejemplo, la ley del mínimo de Justus von Liebig (“la producción está limitada por el elemento más escaso”) sigue siendo válida, aunque se reconoce que la interacción entre nutrientes la completa.

## 1.4 Principales elementos y sus particularidades en el suelo agrícola

- **Nitrógeno (N):** presente en formas como  $\text{NH}_4^+$  o  $\text{NO}_3^-$ ; su disponibilidad depende de la mineralización de la materia orgánica y de procesos como nitrificación y desnitrificación. Las pérdidas pueden ser grandes en suelos muy húmedos o compactados.
- **Fósforo (P):** su disponibilidad en suelos suele estar limitada por la fijación a Fe-Al óxidos, precipitación cálcica o adsorción en las arcillas. En suelos muy ácidos o muy alcalinos, la tasa de disponibilidad es baja.
- **Potasio (K):** se encuentra como  $\text{K}^+$  en solución o intercambio, pero también puede quedar “fijado” en la estructura de arcillas de tipo. En suelos de baja CIC o alto drenaje, la pérdida por lixiviación es mayor.
- **Calcio (Ca) y Magnesio (Mg):** ambos son cationes esenciales que además influyen en la estructura del suelo (floculación/dispersión). La relación Ca/Mg es relevante; un exceso de Mg tiende a problemas de estructura, un exceso de Ca en suelos calcáreos puede limitar otros nutrientes.
- **Azufre (S):** suele estar en forma de  $\text{SO}_4^{2-}$ , y su disponibilidad depende de la mineralización de la MO o de la aplicación de fertilizantes. Es muy móvil, por lo que pérdidas por lixiviación pueden ser importantes. Cada uno de estos elementos requiere ser valorado no solo en su forma total sino en su forma disponible y sus interacciones.

## 1.5 Interpretación y toma de decisiones en suelos agrícolas

Para un manejo eficaz se requiere:

- Realizar análisis de suelo que contemplen formas intercambiables/disponibles (en lugar de solo totales).
- Interpretar los datos en función de la **textura, actividad de arcilla, materia orgánica, pH, drenaje, estructura**, ya que todos esos condicionantes afectan la dinámica de los nutrientes.
- Tener en cuenta las **relaciones iónicas**: por ejemplo, la relación Ca/Mg,  $\text{K}/(\text{Ca}+\text{Mg})$  y el % saturación de bases S/T, que permiten evaluar antagonismos.
- Priorizar la **corrección de forma** antes que únicamente la cantidad: es mejor mejorar la forma (disponibilidad) de un nutriente que

aplicar grandes cantidades que pueden perderse o generar desequilibrios.

- Integrar las prácticas nutricionales con los demás factores del suelo: estructura, porosidad, humedad, aireación, biología del suelo — ya que un nutriente disponible no es útil si la planta no puede absorberlo por otras limitantes físicas o hidráulicas.
- Considerar sostenibilidad: un exceso de aplicación puede provocar contaminación, desequilibrios ecológicos o agotamiento de otros recursos.

## 1.6 Conclusión del marco teórico

El manejo moderno de los elementos esenciales en los suelos agrícolas exige una visión integrada: conocer las formas químicas, entender las pérdidas y ganancias en función de las condiciones edáficas y climáticas, interpretar las interacciones nutritivas, y tomar decisiones basadas en análisis, textura, estructura, drenaje y otros factores del perfil. Solo de este modo es posible optimizar la nutrición vegetal, mejorar la fertilidad del suelo y avanzar hacia una agricultura sostenible.

## 2. Ejercicios a Resolver en Clase

Una vez estudiado el ejercicio resuelto presentado en la sección anterior, el estudiante deberá **analizar en equipos** los suelos propuestos por el docente. A partir de la **descripción morfológica del perfil** y los **resultados analíticos** proporcionados, cada grupo deberá:

1. Identificar las **formas predominantes** de los macroelementos esenciales (N, P, K, Ca, Mg y S).
2. Evaluar las **posibles pérdidas o carencias** según las condiciones del suelo.
3. Interpretar los resultados en relación con las características físicas y químicas observadas.
4. Elaborar un **informe técnico** con la discusión de los hallazgos y una propuesta de manejo nutricional integral.

### 1. Suelo 2 – Aluvial Tropical con Signos de Gleyzación

#### Factores Formadores

- Clima: Tropical
- Relieve: Llano
- Material originario: Depósitos aluviales antiguos
- Vegetación: Pastos y arbustos espinosos

## Descripción Morfológica

- A1 (0–22 cm): Arcilla parda (10YR 5/3), estructura poliédrica pequeña, algo mullida, plástica; se agrieta al secar. No reacciona al HCl.
- B(g) (22–62 cm): Arcilla amarillenta (2.5Y 7/6) con manchas gris-verdosas, estructura prismática, firme, con caras de deslizamiento. Reacciona ligeramente al HCl.
- C(g) (62–120 cm): Arcilla amarilla (2.5Y 8/6) con manchas grises, muy plástica, sin raíces visibles. Reacciona ligeramente al HCl.

## Resultados Analíticos Principales

**Tabla x. Propiedades químicas principales**

| HORIZONTE     | PH KCL | HUMUS (%) | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (%) | CA   | MG   | K   | N A | S    | T    |
|---------------|--------|-----------|-----------------------------------|------|------|-----|-----|------|------|
| A1 (0–22)     | 7.8    | 5.3       | 1.2                               | 24.0 | 15.7 | 3.7 | 1.3 | 44.8 | 44.8 |
| B(G) (22–62)  | 7.7    | 3.2       | 4.3                               | 18.2 | 14.7 | 4.6 | 1.3 | 40.5 | 40.5 |
| C(G) (62–120) | 7.6    | —         | 4.5                               | 18.0 | 16.7 | 3.1 | 2.8 | 41.8 | 41.8 |

**Tabla 2. Propiedades físicas e hidrofísicas**

| HORIZONTE     | ARCILLA (%) | PT (%) | MACRO-POROS (%) | C. CAMPO (%) | C. MARC H. (%) | HY (%) | IP | VI (MM/H) |
|---------------|-------------|--------|-----------------|--------------|----------------|--------|----|-----------|
| A1 (0–22)     | 80          | 76.5   | 10.1            | 45.8         | 30.2           | 18.5   | 45 | 3.4       |
| B(G) (22–62)  | 80          | 75.5   | 8.2             | 47.8         | 28.4           | 17.5   | 50 | —         |
| C(G) (62–120) | 80          | 76.5   | 5.4             | 47.3         | 28.2           | 17.0   | 44 | —         |

## Guía Interpretativa

- **pH:** Ligeramente alcalino → posible precipitación de fosfatos cálcicos.
- **CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>:** Moderado a alto → tendencia a suelos calcáreos con baja disponibilidad de P y micronutrientes.
- **Arcilla (80%) y alta CIC:** Buen poder de adsorción, pero riesgo de fijación de K.
- **Gleyzación (B(g), C(g)):** Indica drenaje deficiente → posible pérdida de N por desnitrificación.
- **Altos valores de S = T:** Suelo saturado en bases, pero con posible desbalance Ca/Mg (proporción alta).

### Análisis Sugerido

- N: Riesgo de pérdida por desnitrificación y baja mineralización (pH alto).
- P: Carente por fijación cálcica.
- K: Fijación parcial en arcillas 2:1.
- Ca y Mg: Elevados, pero con posible antagonismo.
- S: Retenido en forma de sulfatos, pero susceptible a lixiviación.

## 2. Suelo 3 – Fersialítico sobre Serpentinita

### Factores Formadores

- Clima: Tropical húmedo
- Relieve: Ondulado (6–7 %)
- Material originario: Roca ígnea ultrabásica (serpentinita)
- Vegetación: Bosques húmedos

### Descripción Morfológica

- A1 (0–10 cm): Arcilla rojo-pardusca oscura (10 YR 3/3), estructura nuciforme, friable, muchas raíces.
- B (10–30 cm): Arcilla rojo-pardusca (2.5R 3/5), estructura fina, más firme, pocas raíces.
- C (30+ cm): Serpentinita alterada y consolidada.

### Resultados Analíticos Principales

**Tabla 1. Propiedades químicas principales**

| HOR. | PH  | HUMUS % | CA   | MG  | K   | NA | S    | T    |
|------|-----|---------|------|-----|-----|----|------|------|
| A1   | 6.3 | 2.78    | 13.4 | 3.2 | 0.1 | —  | 22.8 | 30.2 |

|    |     |      |      |     |     |   |      |      |
|----|-----|------|------|-----|-----|---|------|------|
| AC | 6.5 | 1.01 | 19.4 | 3.0 | 0.2 | — | 28.8 | 33.1 |
|----|-----|------|------|-----|-----|---|------|------|

**Tabla 2. Propiedades físicas e hidrofísicas**

| HOR. | ARC.<br>% | SiO <sub>2</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | PT<br>% | MACRO<br>% | C.C.<br>% | C.M.<br>% | HY<br>% | IP | VI<br>MM/H |
|------|-----------|--------------------------------------------------|---------|------------|-----------|-----------|---------|----|------------|
| A1   | 25        | 7.5                                              | 50.4    | 20.0       | 33.3      | 18.2      | 8.4     | 28 | 60.2       |
| AC   | 32        | 7.8                                              | 54.9    | 18.8       | 41.6      | 24.5      | 10.2    | 30 |            |

### Guía Interpretativa

- **pH moderadamente ácido:** posible solubilización de Al y Fe → fijación de P.
- **Material ultrabásico:** alto Mg, bajo Ca, posible toxicidad por Ni y Cr.
- **CIC baja (T ≈ 30 mmol/100g):** limitada capacidad de intercambio.
- **Fe libre alto:** favorece la retención de fosfatos.
- **Porosidad alta (20% macro):** buena aireación, pero riesgo de lixiviación de K y N.

### Análisis Sugerido

- **N:** Pérdidas por lavado; baja MO limita reserva.
- **P:** Fijación por Fe y Al, disponibilidad baja.
- **K:** Mínimo, por bajo contenido mineral potásico.
- **Ca/Mg:** Relación desfavorable (<1), tendencia a suelos magnesianos.
- **S:** Mínima retención por baja CIC.

## 3. Suelo 4 – Calizo Margoso Tropical

### Factores Formadores

- Clima: Tropical húmedo (1 400 mm/año)
- Relieve: Ligeramente alomado (9–10 %)
- Material originario: Roca caliza suave
- Vegetación: Bosques húmedos

### Descripción Morfológica

- A1 (0–25 cm): Arcilla pardo-oscuro, estructura poliédrica, firme, reacciona al HCl.
- AC (25–45 cm): Arcilla muy calcárea, pardo amarillenta, con fragmentos de caliza.
- C (45–90 cm): Caliza margosa blanquecina con fragmentos semiduros.

## Resultados Analíticos Principales

| HO<br>RIZ<br>ON<br>TE | P<br>H<br>K<br>C<br>L | H<br>U<br>M<br>U<br>S<br>(%) | C<br>O <sub>3</sub> <sup>2-</sup><br>(%) | C<br>A           | M<br>G      | K           | N<br>A      | S                | T                | A<br>R<br>C<br>I<br>L<br>L<br>A<br>(%) | P<br>T<br>(%)    | M<br>A<br>C<br>R<br>O<br>-<br>P<br>O<br>R<br>O<br>S<br>(%) | C.<br>C<br>A<br>M<br>P<br>O<br>(%) | C.<br>M<br>A<br>R<br>C<br>H<br>(%) | H<br>Y<br>(%)    | I<br>P | VI<br>(<br>M<br>M<br>/H<br>) |
|-----------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------------------|------------------|-------------|-------------|-------------|------------------|------------------|----------------------------------------|------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------|--------|------------------------------|
| A1                    | 7<br>·<br>2           | 5.<br>2                      | 6<br>·<br>0                              | 5<br>0<br>·<br>0 | 4<br>·<br>4 | 0<br>·<br>4 | 0<br>·<br>7 | 5<br>5<br>·<br>6 | 5<br>5<br>·<br>6 | 38                                     | 6<br>8<br>·<br>5 | 20<br>·<br>2                                               | 40<br>·<br>2                       | 25<br>·<br>1                       | 1<br>2<br>·<br>6 | 3<br>5 | 40<br>·<br>2                 |
| AC                    | 7<br>·<br>3           | 2.<br>4                      | 2<br>4                                   | 3<br>3<br>·<br>3 | 3<br>·<br>9 | 0<br>·<br>2 | 0<br>·<br>8 | 3<br>8<br>·<br>1 | 3<br>8<br>·<br>1 | 36                                     | 5<br>2<br>·<br>3 | 15<br>·<br>0                                               | 36<br>·<br>0                       | 18<br>·<br>3                       | 8<br>·<br>7      | 2<br>8 | —                            |
| C                     | 8<br>·<br>2           | —                            | 5<br>0                                   | 1<br>5<br>·<br>6 | 3<br>·<br>5 | 0<br>·<br>1 | 1<br>·<br>6 | 2<br>0<br>·<br>9 |                  |                                        |                  |                                                            |                                    |                                    |                  |        |                              |

### Guía Interpretativa

- **pH alcalino y alto CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>**: típico de suelos calcáreos; P precipitado como Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.
- **Alta saturación en bases**: S ≈ T → disponibilidad de cationes, pero bloqueo de micronutrientes (Fe, Zn, Mn).
- **Arcilla 35–38 %**: buena retención de agua, pero baja disponibilidad de P y K.
- **Ca/Mg ≈ 10**: relación muy alta, limita absorción de Mg y K.

### Análisis Sugerido

- **N**: Baja mineralización de MO; pérdidas por volatilización de NH<sub>3</sub>.
- **P**: Inmovilizado por precipitación cálcica.
- **K**: Deficiente por antagonismo Ca–K.
- **Ca**: Exceso, responsable de desbalances.
- **Mg**: Deficiente por desplazamiento iónico.

- **S:** Alto pH limita su oxidación a  $\text{SO}_4^{2-}$  disponible

### 3. Conclusión del Taller

Los estudiantes deberán presentar un **informe comparativo** donde:

- Identifiquen diferencias entre suelos tropicales, ferruginosos y calcáreos.
- Propongan **estrategias de manejo integrado de la nutrición vegetal**, priorizando correcciones sostenibles (orgánicas, químicas y biológicas).
- Discutan cómo las condiciones climáticas y edáficas del Ecuador condicionan la disponibilidad y movilidad de los nutrientes esenciales.

## CAPÍTULO VI: MANEJO DE LA FERTILIZACIÓN QUÍMICA Y ORGÁNICA EN SISTEMAS PRODUCTIVOS

*Título: Selección y cálculo de dosis y cantidad de portadores simples a mezclar para preparar una fórmula en un centro agroquímico o suplir la necesidad real de fertilización de un cultivo en la unidad de producción*

### 1. Objetivos

- Calcular la dosis y cantidad de fertilizantes a mezclar partiendo del conocimiento de la necesidad real de los cultivos, utilizando portadores simples, con o sin abonos orgánicos.
- Seleccionar los portadores simples más adecuados a las características del suelo, evitando pérdidas de nutrientes o efectos negativos en la productividad y la sostenibilidad del agroecosistema.

### 2. Fundamentación teórica

El manejo racional de la fertilización constituye un pilar fundamental en la sostenibilidad de los sistemas agrícolas ecuatorianos, donde la diversidad de suelos —desde Ferralíticos en zonas tropicales húmedas hasta Andosoles y Entisoles en la Sierra y Costa— condiciona de manera directa la eficiencia del uso de nutrientes.

En la práctica, la disponibilidad de fertilizantes industriales específicos para cada cultivo es limitada. Por tanto, el ingeniero agrónomo o especialista en nutrición vegetal debe **formular mezclas balanceadas** a partir de **portadores simples** (fuentes puras de N,  $P_2O_5$ ,  $K_2O$ , Ca, Mg o S), seleccionando los materiales más compatibles con el tipo de suelo, pH, textura y régimen hídrico.

Existen dos escenarios operativos principales:

- **Fertilización con portadores simples disponibles:**  
Se realiza la mezcla directamente en la unidad de producción o en un **Centro Agroquímico**, que elabora la fórmula requerida. En este caso, la fórmula resultante no debe almacenarse por períodos prolongados, ya que las reacciones entre los portadores (como entre urea y fosfatos) pueden deteriorar la calidad física del fertilizante.
- **Fertilización combinada (orgánico-química):**  
La integración de abonos orgánicos (compost, humus de lombriz, estiércol tratado, etc.) con portadores simples permite reducir dosis

químicas, mejorar la estructura del suelo y optimizar la liberación progresiva de nutrientes.

## 2.1 Principales variantes de cálculo

El especialista puede enfrentarse a tres situaciones de campo frecuentes:

- **Cálculo de mezclas con portadores simples:**  
Determinar las proporciones adecuadas de cada portador para obtener una fórmula balanceada que responda a la necesidad real del cultivo.
- **Cálculo de aporte combinado:**  
Estimar el aporte de nutrientes proveniente de abonos orgánicos y ajustar las dosis químicas para evitar excesos o deficiencias.
- **Selección o ajuste de fórmulas comerciales:**  
Comparar la relación N:P:K de las fórmulas disponibles en el mercado con las necesidades del cultivo, aplicando el principio del “ajuste de fórmula”.

## 2.2 Ejercicios resueltos

### Ejercicio 1. Preparación de una fórmula completa 10–6–13

#### Problema:

Preparar 1 tonelada de la fórmula 10–6–13 utilizando portadores simples: urea (46–0–0), superfosfato simple (0–20–0) y cloruro de potasio (0–0–60).

#### Cálculo:

| NUTRIENTE                     | NECESIDAD (KG/HA) | PORTADOR | % NUTRIENTE | DOSIS (KG/HA) |
|-------------------------------|-------------------|----------|-------------|---------------|
| N                             | 100               | Urea     | 46          | 217           |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 60                | S.S.     | 20          | 300           |
| K <sub>2</sub> O              | 130               | KCl      | 60          | 217           |

Suma de portadores: 217 + 300 + 217 = 734 kg  
Relleno: 1000 – 734 = 266 kg

#### Respuesta:

Para preparar 1 tonelada de la fórmula 10–6–13 se requieren:

- 217 kg de urea

- 300 kg de superfosfato simple
- 217 kg de cloruro de potasio
- 266 kg de material de relleno (arena inerte o fosforita fina).

## Ejercicio 2. Fertilización de fondo para maíz (5 ha)

- **Condiciones:**  
Suelo pardo con carbonatos; se dispone de urea, superfosfato triple (SFT) y KCl.
- Necesidad real: 120–60–100 (N–P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–K<sub>2</sub>O)

### Selección de portadores:

- **Urea (46–0–0):** adecuada en suelos carbonatados si se aplica enterrada.
- **SFT (0–46–0):** fuente concentrada y soluble de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.
- **KCl (0–0–60):** alta disponibilidad de K<sub>2</sub>O y bajo costo.

### Cálculo de dosis por hectárea:

| NUTRIENTE                     | NECESIDAD (KG/HA) | PORTADOR | % NUTRIENTE | DOSIS (KG/HA) |
|-------------------------------|-------------------|----------|-------------|---------------|
| N                             | 120               | Urea     | 46          | 261           |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 60                | SFT      | 46          | 130           |
| K <sub>2</sub> O              | 100               | KCl      | 60          | 167           |

**Dosis total:** 261 + 130 + 167 = 558 kg/ha  
Cantidad para 5 ha: 2,79 t de mezcla.

### Distribución total:

- 1,30 t urea
- 0,65 t SFT
- 0,84 t KCl

## Ejercicio 3. Fraccionamiento del Nitrógeno

Aplicar el 50 % del N a los 25 días de la siembra.

- Primera aplicación (fondo): 130 kg/ha urea, 130 kg/ha SFT, 167 kg/ha KCl.
- Segunda aplicación (cobertura): 130 kg/ha urea.

**Total, para 5 ha:**

- Urea: 1.3 t
- SFT: 0.65 t
- KCl: 0.84 t

#### Ejercicio 4. Aporte combinado con compost

Aplicar 10 t/ha de compost (40 % humedad; N=2.1 %, P=0.7 %, K=1.2 %).

Aprovechamiento estimado: 30 % del N, P y K totales.

| NUTRIENTE                     | COMPOST SECO<br>(KG/HA) | CONTENIDO<br>(%) | APORTE TOTAL<br>(KG/HA) | APROVECHABLE<br>(30%) |
|-------------------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|-----------------------|
| N                             | 6000                    | 2.1              | 126                     | 38                    |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 6000                    | 0.7×2.29         | 96.2                    | 29                    |
| K <sub>2</sub> O              | 6000                    | 1.2×1.20         | 86.7                    | 26                    |

**Necesidad restante:** 82–31–74 (N–P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–K<sub>2</sub>O)

| NUTRIENTE                     | PORTADOR | % NUTRIENTE | DOSIS (KG/HA) |
|-------------------------------|----------|-------------|---------------|
| N                             | Urea     | 46          | 178           |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | SFT      | 46          | 67            |
| K <sub>2</sub> O              | KCl      | 60          | 123           |

**Dosis total:** 368 kg/ha

**Cantidad total para 5 ha:**

- Compost: 50 t
- Urea: 0.9 t
- SFT: 0.34 t
- KCl: 0.6 t

### 3. Ejercicios propuestos

1. Determine la cantidad de N aplicada si se usó **1.2 t/ha de nitrato de amonio (33–0–0)**.
2. Calcule la dosis de **KCl (0–0–60)** para aportar **120 kg/ha de K<sub>2</sub>O**.
3. Si el superfosfato simple contiene **10 % de azufre**, determine cuánto S se aplica con 500 kg/ha.

4. Formule **20 t de la mezcla 14–10–12**, seleccionando los portadores más adecuados para arroz en suelo Gley oscuro plástico.
5. Calcule la dosis fraccionada de fertilizantes para tabaco (110–80–160) aplicando 40 % del N a los 30 días.
6. Determine la dosis de fertilización combinada para un cultivo de larga duración con **5 t/ha de humus de lombriz** (N=2.3 %, P=0.5 %, K=0.3 %, 70 % de mineralización).
7. Evalúe la efectividad de una aplicación de **1.3 t/ha de fórmula 12–6–14**, si la dosis recomendada es **150–80–120**.
8. Evalúe la efectividad de **1.5 t/ha de fórmula 14–8–12** sobre un pastizal con dosis recomendada **140–80–120**.
9. Analice la eficiencia de tres estrategias de aplicación de  $K_2O$  por campesinos con diferentes fuentes (KCl,  $K_2SO_4$ , fórmula 10–8–20).

## **Cálculo de dosis y cantidad de fertilizantes a partir de la selección de la fórmula más adecuada, aplicando el ajuste de fórmulas**

### **1. Objetivos**

- Seleccionar la fórmula más adecuada mediante ajuste de fórmulas en fertilización de fondo y fraccionada.
- Calcular dosis (kg/ha) y cantidades totales (t) de fertilizantes cuando se dispone de fórmulas completas.

### **2. Criterios de selección (reglas operativas)**

#### **2.1 Si toda la fertilización es de fondo**

- 1 Preferir una fórmula cuya **relación internutrientes (ri)** sea **igual** a la derivada de la necesidad real (NR).
- 2 Si no existe, escoger fórmula con **ri de  $P_2O_5$  igual y N y/o  $K_2O$**  dentro de **±10–15 %** respecto a la ri objetivo.

**Nota de tolerancia:** Diferencias  $\leq 15$  % respecto a la **dosis** recomendada de cada nutriente se consideran aceptables.

## 2.2 Si hay fertilización fraccionada (fondo + cobertura)

- 1 Para la aplicación de **fondo**, escoger fórmula con **ri en  $P_2O_5$  y  $K_2O$**  coincidente y **N menor** ( $\approx$  la mitad). El N faltante se completa en **cobertura** con un **portador nitrogenado**.
- 2 Alternativamente, fórmula con **ri en  $P_2O_5$  coincidente y N y  $K_2O$  por debajo**; ambos se completan en cobertura si el faltante supera el 15 %.

## 3. Procedimiento general (algoritmo breve)

- **Derivar fórmula objetivo** desde la NR: dividir  $N - P_2O_5 - K_2O$  entre 10 y redondear a enteros; calcular **ri** dividiendo cada nutriente entre  $P_2O_5$ .
- **Calcular ri** de las fórmulas disponibles.
- **Seleccionar** la fórmula según el tipo de fertilización (fondo o fraccionada) y criterios de 1.
- **Dosis de fórmula** (kg/ha), basada en  $P_2O_5$ :

$$\text{Dosis (kg/ha)} = \frac{\text{NR de } P_2O_5}{\%P_2O_5 \text{ de la fórmula}/100}$$

- **Aportes** de N y  $K_2O$  de la dosis calculada:

$$\text{Aporte } X = \text{Dosis} \times \frac{\%X \text{ de la fórmula}}{100}$$

- **Verificar tolerancias** ( $\pm 10$ – $15$  %).
- En **fondo**: si N y  $K_2O$  están dentro de tolerancia, se acepta.
- En **fraccionada**: calcular **faltantes** (y exceso si fuera el caso) y completar con portadores (N y/o  $K_2O$ ) en cobertura.
- **Cantidad total (t)** para el área:

$$\text{Cantidad (t)} = \frac{\text{Dosis (kg/ha)} \times \text{Área (ha)}}{1000}$$

## 4. Ejemplos resueltos

### Ejemplo 1. Fertilización de fondo (NR: 120–72–210 kg/ha)

Suelo: Ferralítico rojo, buen drenaje, pH 5.5.

Fórmulas disponibles: 18–6–18; 6–5–15; 12–12–12; 8–5–14.

**Paso 1 – Fórmula objetivo y ri:**

NR  $\approx$  12–7–21  $\rightarrow$  ri objetivo = (1.71 – 1 – 3.00).

Paso 2 – ri disponibles:

$$18 - 6 - 18 \rightarrow (3 - 1 - 3)$$

$$6 - 5 - 15 \rightarrow (1.2 - 1 - 3)$$

$$12 - 12 - 12 \rightarrow (1 - 1 - 1)$$

$$8 - 5 - 14 \rightarrow (1.6 - 1 - 2.8)$$

Paso 3 – Selección:

**8 – 5 – 14** cumple  $P_2O_5$ ; N y  $K_2O$  difieren **6 – 7 %** ( $\leq 15$  %). Se acepta.

Paso 4 – Dosis por  $P_2O_5$ :

$$P_2O_5 \text{ requerido} = 72; \%P_2O_5 = 5$$
$$Dosis = 72 / 0.05 = \mathbf{1440 \text{ kg/ha}}$$

Paso 5 – Aportes de N y  $K_2O$  con la dosis:

$$N: 1440 \times 0.08 = \mathbf{115.2 \text{ kg/ha}} \text{ (déficit 4 \%)}$$

$$K_2O: 1440 \times 0.14 = \mathbf{201.6 \text{ kg/ha}} \text{ (déficit 4 \%)}$$

*Ambos dentro de  $\pm 15$  %  $\Rightarrow$  válido como fondo.*

$$\text{Cantidad total (5 ha): } 1440 \times 5/1000 = \mathbf{7.2 \text{ t}}$$

**Respuesta didáctica:**

Aplicar 8–5–14 a 1440 kg/ha (total 7.2 t para 5 ha). Los aportes de N y  $K_2O$  se encuentran dentro del rango operativo admisible ( $\pm 15$  %).

**Ejemplo 2. Fertilización fraccionada (tabaco)**

**NR:** 145–29–111 kg/ha. Área: 5 ha. Suelo muy ácido.

**Disponibles:** 20–4–14; 6–9–12; 12–6–24; 25–5–30; 14–6–12; 20–4–10; 12–3–10; 20–0–0; 33–0–0; 0–46–0; 0–0–50; 0–0–60.

**Criterio:** fraccionar N;  $P_2O_5$  completo en fondo.

**Selección (resumen):** **12 – 6 – 24** (ri: 2 – 1 – 4)  $\rightarrow$  N por debajo  $\approx$  mitad;  $K_2O$  + 9 % (aceptable).

**Dosis de fondo por  $P_2O_5$ :**

$$Dosis = 29 / 0.06 = \mathbf{483 \text{ kg/ha}}$$

**Aportes de fondo:**

$$N: 483 \times 0.12 = \mathbf{58 \text{ kg/ha}}$$

$$K_2O: 483 \times 0.24 = \mathbf{116 \text{ kg/ha}}$$

### Faltantes/excesos vs NR:

$$N \text{ faltante: } 145 - 58 = 87 \text{ kg/ha}$$

$$K_2O \text{ exceso: } 116 - 111 = 5 \text{ kg/ha } (< 15 \%, \text{ despreciable})$$

### Cobertura (N):

Portador recomendado (suelo ácido): nitrato de amonio 33-0-0 en superficie.

$$\text{Dosis NA} = 87 / 0.33 = 263 \text{ kg/ha}$$

### Cantidades totales (5 ha):

$$\text{Fondo } 12 - 6 - 24: 483 \times 5/1000 = 2.415 \text{ t}$$

$$\text{Cobertura } 33 - 0 - 0: 263 \times 5/1000 = 1.315 \text{ t}$$

### Respuesta didáctica:

Fondo: **12 – 6 – 24 a 483 kg/ha**. Cobertura: **33 – 0 – 0 a 263 kg/ha**.

Totales: 2.4 t y 1.3 t para 5 ha, respectivamente.

## 5. Plantillas listas para copiar (cuadros de trabajo)

### 5.1 Hoja rápida de selección por ri

| CONCEPTO                         | N | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O |
|----------------------------------|---|-------------------------------|------------------|
| NR (KG/HA)                       |   |                               |                  |
| FÓRMULA OBJETIVO (÷10, REDONDEO) |   |                               |                  |
| RI OBJETIVO (= N/P; 1; K/P)      |   | 1                             |                  |
| FÓRMULA A (RI)                   |   | 1                             |                  |
| FÓRMULA B (RI)                   |   | 1                             |                  |
| FÓRMULA C (RI)                   |   | 1                             |                  |
| ELEGIDA                          |   |                               |                  |

**Regla:** aceptar si  $|\Delta ri| \leq 15 \%$  (o si el desvío en **dosis** por nutriente queda  $\leq 15 \%$ ).

## 5.2 Hoja de cálculo de dosis y aportes

| PASO                       | CÁLCULO                           | RESULTADO                |
|----------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| DOSIS POR $P_2O_5$         | $NR(P)/(\%P/100)$                 |                          |
| APORTE N                   | $Dosis \times (\%N/100)$          |                          |
| APORTE $K_2O$              | $Dosis \times (\%K/100)$          |                          |
| DIFERENCIA VS NR           | (N: $\pm$ ) (K: $\pm$ )           |                          |
| ¿DENTRO DE $\pm 15$ %?     | Sí/No                             |                          |
| SI FRACCIONADA: N FALTANTE | $NR(N) - Aporte\ N$               |                          |
| PORTADOR N COBERTURA       |                                   | $Dosis = N_{falt} / \%N$ |
| CANTIDADES (T)             | $Dosis \times \text{Área} / 1000$ |                          |

## 6. Notas técnicas útiles (operativas)

- Portador N en suelos ácidos (cobertura): preferir nitrato de amonio (33-0-0) o urea bien incorporada si no hay riesgo de volatilización.
- Tolerancias: manejar  $\pm 10$ –15 % para ajustar en campo sin complejizar logística; si el desvío supera 15 %, reevaluar fórmula.
- Costeo: cuando existan dos opciones equivalentes por ri, decidir por costo por unidad de nutriente y compatibilidad de mezcla.
- Manejo: documentar momento y localización (a voleo/localizada; incorporación/superficie) para reducir pérdidas.

## 7. Ejercicios propuestos

1. **Tomate. Fondo.** NR = 120–72–210 kg/ha. Área = 7 ha. Disponibles: 18–6–18; 6–5–15; 12–12–12; 8–5–14.
2. **Ferralítico amarillo lixiviado. Fondo.** NR = 150–30–158 kg/ha. Área = 3 ha. Disponibles: 12–2–10; 21–4–21; 9–3–12; 12–12–12; 20–5–25; 33–0–0; 0–15–0; 0–20–0; 0–0–50; 0–0–60; 20–0–0.
3. Resolver el **ejercicio 2** usando **todas** las combinaciones viables y comparar costos por unidad de nutriente.
4. **Hortícola en hileras. Fraccionada.** NR = 160–80–240 kg/ha. Suelo Pardo con carbonatos. Disponibles: 12–6–18; 6–6–18; 9–9–9; 10–4–12; 12–24–12; 11–7–21;  $(NH_4)_2SO_4$ ;  $NH_4NO_3$ ; SFT; KCl;  $K_2SO_4$ .

5. **Suelo con acidez tóxica y muy buen drenaje. Fraccionada.** NR = 180–60–120 kg/ha. Disponibles:

12 – 5 – 10; 9 – 6 – 12; 9 – 9 – 9; 12 – 4 – 8; 12 – 24 – 12; 10 – 7  
– 21;  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ; *Urea*; *SFT*;  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ; *KCl*.

## **Integración del cálculo y aplicación de fertilizantes químicos para la rehabilitación de suelos y la sostenibilidad agroambiental en el Ecuador**

### **1. Introducción**

La degradación de los suelos en el Ecuador constituye uno de los principales retos para la sostenibilidad ambiental y la seguridad alimentaria. Los procesos de erosión, compactación, pérdida de materia orgánica y desequilibrio de nutrientes han reducido la capacidad productiva de amplias zonas agrícolas y periurbanas. En este contexto, el manejo racional de fertilizantes químicos se convierte en una herramienta técnica esencial dentro de los programas de **rehabilitación y conservación de suelos**.

El uso eficiente de fertilizantes no solo persigue incrementar los rendimientos de los cultivos, sino también **restaurar las propiedades químicas y biológicas del suelo**, evitando la sobreexplotación de nutrientes y minimizando la contaminación de cuerpos de agua por lixiviación o escorrentía. Para ello, el ingeniero ambiental o agrónomo debe ser capaz de **calcular las dosis, seleccionar las fórmulas adecuadas y ajustar la aplicación a las condiciones edáficas específicas**, integrando criterios de sostenibilidad y economía circular (por ejemplo, el uso combinado de compost, humus y residuos agroindustriales).

Este capítulo desarrolla los fundamentos teórico-prácticos para realizar **ajustes de fórmulas fertilizantes y cálculos de dosis racionales** aplicables en los programas de rehabilitación de suelos ecuatorianos, considerando las particularidades de los ecosistemas tropicales y las zonas andinas.

### **2. Objetivos**

#### **2.1 Objetivo general:**

Aplicar principios técnicos y ambientales para el cálculo, selección y aplicación sostenible de fertilizantes químicos en suelos degradados del Ecuador, integrando la restauración edáfica con la productividad agrícola.

## 2.2 Objetivos específicos:

- Determinar la dosis óptima de fertilizantes a partir de las necesidades del suelo y del cultivo, utilizando fórmulas completas o portadores simples.
- Seleccionar las combinaciones de fertilizantes más adecuadas para cada tipo de suelo, evitando pérdidas y desequilibrios químicos.
- Aplicar el método de ajuste de fórmulas para establecer planes de fertilización racional en contextos de rehabilitación edáfica.
- Integrar la fertilización química con enmiendas orgánicas y prácticas sostenibles de manejo de suelos.

## 3. Desarrollo teórico-práctico

### 3.1 Fundamentos técnicos de la fertilización en suelos degradados

El cálculo de fertilizantes debe sustentarse en un diagnóstico previo del suelo, el cual incluya el contenido de materia orgánica, el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la textura y la presencia de sales o carbonatos. En Ecuador, los suelos más degradados suelen encontrarse en la región Litoral (erosión y salinización), Andes (acidificación y pérdida de estructura) y Amazonía (lixiviación intensa y baja fertilidad natural).

Para rehabilitar estos suelos, el ingeniero debe equilibrar tres aspectos:

- 1 Aporte de nutrientes esenciales (N, P, K, Ca, Mg, S). Los fertilizantes químicos corrigen deficiencias específicas y restablecen la fertilidad edáfica.
- 2 Corrección del pH y reducción de toxicidad. En suelos ácidos, se recomienda el uso de urea o nitrato de amonio combinados con cal agrícola; en suelos alcalinos, se privilegia el uso de sulfato de amonio o enmiendas acidificantes.
- 3 Integración con materia orgánica.
- 4 La incorporación de compost, humus de lombriz o biofertilizantes mejora la estructura del suelo, promueve la retención de agua y activa el microbiota.

### 3.2 Selección y ajuste de fórmulas

El **ajuste de fórmulas** permite adaptar una fórmula comercial de fertilizantes a la necesidad real del cultivo y del suelo. Para ello se utiliza la **relación internutriente (ri)**:

$$ri = \frac{N}{P_2O_5:K_2O}$$

#### Criterios de selección:

- Si la **fertilización es de fondo**, se selecciona la fórmula con ri similar ( $\pm 15\%$ ) a la necesidad real.
- Si la **fertilización es fraccionada**, se elige una fórmula con menor proporción de N, completándose posteriormente con un portador nitrogenado.

### 3.3 Cálculo de dosis de fertilizantes

La dosis se calcula a partir de la concentración de nutrientes del fertilizante:

#### Ejemplo:

Si un cultivo requiere 120 kg/ha de N y se usa urea (46 % N):

$$\frac{120}{46} \times 100 = 261 \text{ kg/ha de urea.}$$

En sistemas sostenibles, este cálculo se combina con el aporte orgánico del compost:

$$\begin{aligned} \text{N real a aplicar} &= \text{N total requerido} \\ &\quad - \text{N aportado por compost (mineralizable)} \end{aligned}$$

### 3.4 Aplicación sostenible de fertilizantes

En programas de rehabilitación, se recomienda aplicar los fertilizantes **de forma localizada y profunda**, evitando pérdidas por volatilización y escorrentía.

Las **buenas prácticas incluyen**:

- Aplicar el 50 % del N en fondo y el resto en cobertura.
- Incorporar compost o humus ( $\geq 5 \text{ t/ha}$ ) para mejorar la eficiencia de los fertilizantes químicos.
- Mantener coberturas vegetales o barreras vivas para reducir la erosión.

## 4. Ejercicio resuelto

Ejemplo aplicado al Ecuador (zona costera – suelo franco-arenoso, pH 4.0):

Datos del cultivo: Maíz (ciclo corto)  
Necesidad real (Nr):

$$160 - 100 - 150 \text{ kg/ha}$$

Portadores disponibles: Urea (46–0–0), Superfosfato triple (0–46–0), Cloruro de potasio (0–0–60).

### 1. Cálculo de las dosis:

$$N: \frac{160}{46} \times 100 = 348 \text{ kg/ha de urea}$$

$$P_2O_5: \frac{100}{46} \times 100 = 217 \text{ kg/ha de SFT}$$

$$K_2O: \frac{150}{60} \times 100 = 250 \text{ kg/ha de KCl}$$

### 2. Dosis total de mezcla:

$$348 + 217 + 250 = 815 \text{ kg/ha de portadores.}$$

### 3. Incorporación de compost:

Si se aplican 10 t/ha de compost (2 % N, 0.7 % P, 1.2 % K), y se mineraliza el 30 %:

$$N = 60 \text{ kg/ha aprovechable}$$

$$P_2O_5 = 48 \text{ kg/ha aprovechable}$$

$$K_2O = 72 \text{ kg/ha aprovechable}$$

### Nuevo requerimiento químico:

$$N = 100 \text{ kg/ha}$$

$$P_2O_5 = 52 \text{ kg/ha}$$

$$K_2O = 78 \text{ kg/ha}$$

### Nueva mezcla:

- Urea: 217 kg/ha
- SFT: 113 kg/ha
- KCl: 130 kg/ha
- Compost: 10 t/ha

**Resultado:** Se reduce en un 33 % el uso de fertilizantes químicos, manteniendo el balance de nutrientes y mejorando la calidad del suelo.

## 5. Ejercicios propuestos

1. En un suelo franco-limoso de pH 5.5, determine la dosis de fertilizantes para un cultivo de arroz con  $Nr$  120 – 60 – 100 kg/

- ha*, considerando 5 t/ha de humus seco ( $N = 2.5 \%$ ,  $P = 0.5 \%$ ,  $K = 0.3 \%$ , 60 % mineralizable).
2. Seleccione la fórmula más adecuada para un suelo calcáreo (pH 7.8) con *Nr* de 150 – 50 – 120 kg/ha, si se dispone de 15–5–10, 12–6–12 y 20–4–16.
  3. Calcule la mezcla de fertilizantes y cantidad total a aplicar para rehabilitar 8 ha de suelos arcillosos ácidos en cacao, con *Nr* 180 – 80 – 160 kg/ha y 6 t/ha de compost.
  4. Diseñe una estrategia integral (¿cuándo?, ¿cómo?, ¿dónde?, ¿cuánto?) de aplicación de fertilizantes para una finca de 10 ha en la Amazonía ecuatoriana, considerando lluvias altas y suelos lixiviados.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

- La aplicación racional de fertilizantes en suelos ecuatorianos debe orientarse no solo a la productividad, sino a la **restauración edáfica y la sostenibilidad ambiental**.
- El **ajuste de fórmulas** y el cálculo de dosis basados en análisis de suelos permiten reducir el uso innecesario de insumos químicos.
- La **integración con abonos orgánicos** y el manejo de la cobertura vegetal mejoran la resiliencia del suelo y disminuyen los impactos de la erosión y la contaminación.
- El ingeniero civil ambiental debe considerar la fertilización como una **estrategia de rehabilitación sostenible**, incorporando indicadores de salud del suelo (pH, CIC, materia orgánica, biota activa) y monitoreo periódico.

## Taller integrador de manejo sostenible del suelo e implementación de sistemas integrados de nutrición vegetal (SINV)

### 1. Introducción

El manejo sostenible de los suelos ecuatorianos representa un desafío técnico y ambiental prioritario para garantizar la seguridad alimentaria y la productividad agropecuaria. En un contexto de creciente degradación física, química y biológica, la **implementación de sistemas integrados de nutrición vegetal (SINV)** constituye una estrategia clave para equilibrar la fertilización mineral, el uso de abonos orgánicos, biofertilizantes y prácticas conservacionistas que mejoren la estructura y la salud del suelo.

El enfoque SINV no se limita a suministrar nutrientes, sino que promueve la **eficiencia en su aprovechamiento, la reducción de pérdidas por lixiviación o erosión, y la regeneración de la materia orgánica**. En Ecuador, los SINV se integran progresivamente en programas de **reconversión agroecológica y rehabilitación edáfica**, impulsados por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) y el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), especialmente en zonas andinas y costeras donde el uso intensivo de fertilizantes químicos ha alterado los equilibrios del suelo.

## 2. Objetivo general

Proponer estrategias integradas de manejo sostenible y nutrición vegetal, considerando el tipo de suelo, su conservación y mejoramiento, los cultivos a establecer, la disponibilidad de fuentes de nutrientes y las condiciones socioeconómicas locales.

## 3. Preparación previa del estudiante

Antes del desarrollo del taller, el estudiante debe revisar los siguientes contenidos:

- Fundamentos de los **Sistemas Integrados de Nutrición Vegetal (SINV)** y su aplicación en contextos tropicales.
- Uso, ventajas y limitaciones de los **fertilizantes químicos, abonos orgánicos y biofertilizantes**.
- Características fisicoquímicas de los abonos orgánicos disponibles localmente, tales como relación **C/N**, porcentaje de **materia orgánica (MO)**, humedad y contenido de nutrientes.
- Principios de **fertilidad edáfica sostenible**, según las normas ecuatorianas de conservación de suelos y aguas (MAATE, 2023).

El estudiante deberá recopilar información técnica sobre los **principales abonos locales**, como compost de estiércol, humus de lombriz, residuos de cacao, gallinaza, bocashi o bioles, analizando sus características para formular recomendaciones integrales de fertilización.

## 4. Metodología de trabajo

El taller se organiza como una actividad integradora de diagnóstico y planificación.

Cada equipo de estudiantes analizará uno de los **cinco sistemas de producción agrícola** descritos, identificando:

- Las **fortalezas y debilidades del sistema** en términos de manejo sostenible del suelo.

- Los **problemas de degradación o mal uso** (erosión, compactación, salinización, pérdida de materia orgánica).
- Las **estrategias integradas de nutrición vegetal** más adecuadas, combinando fertilización química, orgánica y biológica.
- La **viabilidad socioeconómica** de las alternativas propuestas.

Cada grupo elaborará un **informe técnico** con diagnóstico, justificación y plan de manejo integrado del suelo, que será discutido y evaluado en clase bajo la orientación del docente.

## 5. Sistemas propuestos

### Sistema N.º 1: Rotación boniato – maíz en suelos Ferralíticos rojos

**Ubicación referencial:** Zona costera central (Los Ríos – Manabí).

**Características:** Suelo ferralítico rojo, casi llano, bajo nivel de potasio (K) y alto fósforo (P) disponible; laboreo mínimo.

**Problemas:** Deficiencia de K, baja fertilidad orgánica, erosión laminar leve.

**Propuesta SINV:**

- Aplicar cloruro de potasio (KCl) en dosis ajustadas al análisis del suelo.
- Incorporar compost o gallinaza (10 t/ha) antes de la siembra.
- Introducir cultivos de cobertura (canavalia o mucuna) en el ciclo de rotación.
- Mantener el laboreo mínimo para conservar la estructura y evitar compactación.
- Capacitar a los productores en cálculo de dosis racional y control de pérdidas por escorrentía.

### Sistema N.º 2: Rotación frijol – maíz en suelo Ferralítico cuarcítico lixiviado

**Ubicación referencial:** Sierra centro-sur (Chimborazo – Loja).

**Características:** Textura franco-arenosa, relieve ondulado (7–8 %), baja retención de humedad y ausencia de fertilizantes químicos.

**Problemas:** Lixiviación de nutrientes, erosión por pendiente, baja capacidad de intercambio catiónico (CIC).

**Propuesta SINV:**

- Emplear abonos verdes (centrosemia, crotalaria, canavalia) entre ciclos de cultivo.
- Incorporar humus de lombriz (8 t/ha) o compost local para aumentar la MO.
- Promover biofertilizantes líquidos (bioles) elaborados con estiércol bovino y melaza.

- Implementar terrazas de conservación y barreras vivas con vetiver o guadúa para reducir la erosión.
- Evitar el arado profundo y promover prácticas de siembra directa o mínima labranza.

### **Sistema N.º 3: Rotación tomate – habichuela en suelo Húmico calcimórfico**

**Ubicación referencial:** Valles interandinos (Azuay – Cañar).

**Características:** Suelo con 6 % de humus, bajo contenido de fósforo y relieve ligeramente ondulado (5 %).

**Disponibilidad:** Urea, roca fosfórica, cloruro de potasio.

#### **Propuesta SINV:**

- Aplicar roca fosfórica en fondo (pH ligeramente alcalino).
- Incorporar residuos vegetales compostados (8–10 t/ha) y biochar para retener P.
- Fertilización fraccionada del N con urea (50 % fondo, 50 % cobertura).
- Promover rotaciones con leguminosas fijadoras de N (haba, soya, frijol caupí).
- Introducir micorrizas arbusculares para mejorar la absorción de fósforo.

### **Sistema N.º 4: Cultivo sistemático de papa en suelo Ferralítico rojo típico**

**Ubicación referencial:** Sierra norte (Carchi – Cotopaxi).

**Características:** Relieve llano, riego por aspersión, fertilización intensiva y disminución progresiva del rendimiento.

**Problemas:** Compactación del suelo, pérdida de MO, desequilibrio nutricional (exceso de N, déficit de Ca y Mg).

#### **Propuesta SINV:**

- Incorporar abonos orgánicos estabilizados (bocashi, compost) para recuperar estructura.
- Aplicar fertilización balanceada NPK + Ca y Mg según análisis de suelo.
- Reducir la dosis química en un 25 % e introducir rotación con avena forrajera o trébol.
- Implementar labranza vertical o subsolado cada dos años para evitar compactación.
- Capacitar en monitoreo de conductividad eléctrica (CE) para prevenir salinización.

### **Sistema N.º 5: Finca mixta pecuaria – agrícola en suelo Fersialítico pardo rojizo**

**Ubicación referencial:** Zona occidental de Loja o Manabí alto.

**Características:** Pendiente 10–12 %, baja disponibilidad de N y P, poca profundidad.

**Cultivos previstos:** Rotación yuca – frijol.

**Propuesta SINV:**

- Implementar abonos orgánicos locales (estiércol bovino, compost, bioles) ante la falta de fertilizantes químicos.
- Introducir leguminosas de cobertura (centrosemia, kudzu tropical) para fijar nitrógeno.
- Aplicar enmiendas calcáreas moderadas si el pH < 5.5.
- Evitar el laboreo intensivo y promover sistemas agroforestales con sombra parcial.
- Establecer zanjas de infiltración y barreras vegetativas para retener humedad y sedimentos.

## 6. Actividades prácticas del taller

Cada equipo de trabajo deberá entregar un **informe técnico** con:

- **Diagnóstico edáfico:** tipo de suelo, pendiente, textura, drenaje, pH, materia orgánica, problemas observados.
- **Identificación de limitantes:** erosión, compactación, acidez, salinidad o deficiencia nutricional.
- **Propuesta de manejo SINV:**
  1. Selección de fuentes de nutrientes (químicas, orgánicas y biológicas).
  2. Estrategia de aplicación (fondo, fraccionada, cobertura).
  3. Cronograma técnico (época, dosis, método y frecuencia).
  4. Estimación de costos e impactos ambientales.
- **Indicadores de sostenibilidad:** incremento de *MO* (%), mejora de pH, rendimiento, reducción de escorrentía y equilibrio de nutrientes.

## 7. Evaluación

- **Informe técnico escrito (60 %):** claridad, fundamentación técnica, pertinencia y coherencia de la propuesta SINV.
- **Discusión en clase (30 %):** defensa argumentada y análisis comparativo entre sistemas.
- **Participación y trabajo en equipo (10 %):** colaboración, investigación complementaria y presentación.

## 8. Conclusión

El taller integrador permite a los estudiantes comprender que la **fertilidad del suelo no depende exclusivamente del uso de fertilizantes químicos**, sino de un manejo integral que considere las condiciones físicas, biológicas y sociales del entorno. La implementación de **Sistemas Integrados de Nutrición Vegetal** es una herramienta estratégica para avanzar hacia una **agricultura resiliente, baja en insumos externos y ambientalmente responsable**, alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 2, 12 y 15) y con las políticas de rehabilitación edáfica del Ecuador.

## Capítulo X: Evaluación de la Calidad del Suelo en Condiciones de Campo

### 1. Introducción

La calidad del suelo constituye un indicador fundamental de la sostenibilidad agroambiental. Se define como la capacidad del suelo para **mantener su productividad biológica, conservar la calidad ambiental y sustentar la salud vegetal y humana**. En el contexto ecuatoriano, la evaluación de la calidad del suelo adquiere relevancia especial debido a los intensos procesos de **degradación, erosión, pérdida de materia orgánica y compactación** que afectan a los ecosistemas agrícolas, forestales y ganaderos.

Los métodos tradicionales de análisis químico de laboratorio son esenciales, pero insuficientes para comprender la **dinámica integral del suelo en campo**. Por ello, las evaluaciones participativas y visuales permiten observar directamente **propiedades morfológicas, físicas y biológicas** y generar diagnósticos rápidos para orientar decisiones de manejo.

El presente capítulo integra una guía metodológica práctica para la evaluación cualitativa y cuantitativa de la calidad del suelo en campo, adaptada de experiencias del **INCES (Venezuela, 2005)**, el **USDA Soil Quality Institute (1999)** y lineamientos actualizados del **Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG, Ecuador, 2023)**. Su aplicación permite comparar parcelas, identificar problemas de manejo y proponer medidas de conservación y mejoramiento edáfico en condiciones locales.

### 2. Objetivos

- Realizar la caracterización de la calidad del suelo a partir de una guía metodológica sencilla, aplicable en condiciones de campo.

- Establecer criterios de evaluación **cualitativos y cuantitativos** sobre la calidad y salud del suelo, interpretando sus implicaciones en el uso, la productividad y la sostenibilidad agroecológica.

### 3. Fundamentos teóricos

La calidad del suelo depende de la interacción de sus **propiedades físicas, químicas y biológicas**, que determinan su capacidad para sustentar el crecimiento vegetal, regular el flujo de agua, almacenar carbono y resistir la degradación.

#### Indicadores físicos:

Incluyen estructura, textura, compactación, profundidad efectiva, infiltración, retención de humedad y grado de erosión. Estos determinan la **disponibilidad de agua y aire**, la penetración de raíces y la estabilidad frente a lluvias o labores mecánicas.

#### Indicadores químicos:

Abarcan pH, contenido de materia orgánica, nutrientes disponibles (N, P, K, Ca, Mg), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y salinidad. Permiten valorar la **fertilidad intrínseca** y la necesidad de correcciones o enmiendas.

#### Indicadores biológicos:

Evalúan la actividad microbiana, presencia de lombrices y residuos en descomposición, reflejando el grado de **vida del suelo** y su resiliencia ecológica.

La integración de estos factores permite construir un **índice visual de calidad del suelo (IVCS)**, útil para diagnósticos comparativos entre diferentes parcelas, zonas o sistemas productivos.

### 4. Metodología general de campo

1. Seleccionar un área representativa del cultivo o sistema de producción.
2. Dividir el área en puntos de muestreo (mínimo 4 o 5) considerando variaciones de relieve, humedad o manejo.
3. En cada punto, abrir una **calicata de 30–40 cm** para observar horizontes y condiciones morfológicas.
4. Aplicar el **Instrumento de Evaluación de la Calidad del Suelo**, asignando valores de **1 (deficiente)** a **10 (óptimo)** según las características observadas.

5. Registrar las observaciones en fichas de campo y promediar los resultados.
6. Representar gráficamente los indicadores mediante un **diagrama tipo ameba o radar**, donde los radios indican los valores de cada atributo.
7. Interpretar los resultados y emitir **recomendaciones de uso y manejo sostenible**.

## 5. Ejercicio de campo

El docente guiará al grupo hacia un campo de cultivo representativo. En el primer punto se realizará una demostración completa del procedimiento de observación, registro e interpretación.

Luego, los equipos se distribuirán para evaluar las demás muestras de suelo, consolidando los datos y elaborando el gráfico comparativo de calidad (**tipo ameba**).

Finalmente, se discutirá colectivamente:

- Condiciones agroproductivas favorables del suelo.
- Factores que limitan la productividad o sostenibilidad.
- Medidas recomendadas de uso, conservación y rehabilitación.

### Instrumento de Evaluación de la Calidad del Suelo

Bajo la supervisión del docente se llenará la siguiente ficha:

|                         |                    |                            |                     |
|-------------------------|--------------------|----------------------------|---------------------|
| <b>EMPRESA:</b>         | <b>FINCA:</b>      | <b>CAMPO:</b>              | <b>EXTENSIÓN:</b>   |
| <b>USO TRADICIONAL:</b> | <b>USO ACTUAL:</b> | <b>CANTÓN / PROVINCIA:</b> | <b>RESPONSABLE:</b> |

#### 1. Estructura del suelo

**Pregunta: ¿El suelo tiene buena estructura?**

| <b>VALOR</b> | <b>CARACTERÍSTICAS</b>                               |
|--------------|------------------------------------------------------|
| <b>1</b>     | Terreno polvoriento, masivo o sin estructura.        |
| <b>5</b>     | Estructura grumosa poco visible, consistencia firme. |

|           |                                                 |
|-----------|-------------------------------------------------|
| <b>10</b> | Estructura grumosa bien diferenciada y friable. |
|-----------|-------------------------------------------------|

## 2. Compactación

Pregunta: ¿El suelo está libre de capas compactadas?

| VALOR     | CARACTERÍSTICAS                                          |
|-----------|----------------------------------------------------------|
| <b>1</b>  | El cuchillo apenas raya la superficie; raíces desviadas. |
| <b>5</b>  | Restricciones a la penetración; hasta 5 cm.              |
| <b>10</b> | Fácil penetración del cuchillo más allá de 20 cm.        |

## 3. Profundidad efectiva

Pregunta: ¿El suelo se trabaja fácilmente?

| VALOR     | CARACTERÍSTICAS                                   |
|-----------|---------------------------------------------------|
| <b>1</b>  | Rocoso, poca profundidad o pendiente >15 %.       |
| <b>5</b>  | Profundidad media ( $\geq 50$ cm), pocas piedras. |
| <b>10</b> | Profundo, llano, sin obstáculos al laboreo.       |

## 4. Actividad biológica

Pregunta: ¿El suelo está lleno de organismos vivos?

| VALOR     | CARACTERÍSTICAS                                    |
|-----------|----------------------------------------------------|
| <b>1</b>  | No se observan signos de vida.                     |
| <b>5</b>  | Algunos signos (raíces finas, insectos, galerías). |
| <b>10</b> | Alta diversidad biológica visible.                 |

## 5. Estado de residuos

Pregunta: ¿Hay presencia de residuos en descomposición?

| VALOR | CARACTERÍSTICAS |
|-------|-----------------|
|-------|-----------------|

|           |                                                   |
|-----------|---------------------------------------------------|
| <b>1</b>  | Sin residuos.                                     |
| <b>5</b>  | Pocos residuos, lenta descomposición.             |
| <b>10</b> | Muchos residuos, varias etapas de descomposición. |

#### **6. Desarrollo radicular**

**Pregunta:** ¿Las raíces crecen bien?

| <b>VALOR</b> | <b>CARACTERÍSTICAS</b>                      |
|--------------|---------------------------------------------|
| <b>1</b>     | Sistema radical pobre o deformado.          |
| <b>5</b>     | Raíces estructuradas con crecimiento medio. |
| <b>10</b>    | Sistema radicular vigoroso y profundo.      |

#### **7. Color, olor y materia orgánica**

**Pregunta:** ¿El color, olor y humus indican buena calidad?

| <b>VALOR</b> | <b>CARACTERÍSTICAS</b>                              |
|--------------|-----------------------------------------------------|
| <b>1</b>     | Pálido, olor químico, sin materia orgánica visible. |
| <b>5</b>     | Café claro o rojizo, algo de materia orgánica.      |
| <b>10</b>    | Café oscuro o negro, olor fresco y humus evidente.  |

#### **8. Infiltración del agua**

**Pregunta:** ¿El agua infiltra rápidamente?

| <b>VALOR</b> | <b>CARACTERÍSTICAS</b>                   |
|--------------|------------------------------------------|
| <b>1</b>     | Encharcamiento prolongado.               |
| <b>5</b>     | Drenaje lento.                           |
| <b>10</b>    | Infiltración rápida, sin encharcamiento. |

#### **9. Retención de humedad**

**Pregunta:** ¿El agua está disponible para el crecimiento vegetal?

| VALOR | CARACTERÍSTICAS                         |
|-------|-----------------------------------------|
| 1     | Suelo reseco o arenoso, baja retención. |
| 5     | Retención moderada.                     |
| 10    | Buena capacidad de retención hídrica.   |

### 10. Erosión

**Pregunta:** ¿Hay signos de erosión?

| VALOR | CARACTERÍSTICAS                              |
|-------|----------------------------------------------|
| 1     | Erosión severa, cárcavas o arrastre visible. |
| 5     | Evidencia moderada o susceptibilidad.        |
| 10    | No hay signos de erosión.                    |

### 11. Textura

**Pregunta:** ¿Cuál es el tipo de textura predominante?

| VALOR | CARACTERÍSTICAS                                  |
|-------|--------------------------------------------------|
| 1     | Arcilloso muy plástico o arenoso suelto.         |
| 5     | Textura media, sin mayores problemas de manejo.  |
| 10    | Textura franca, equilibrio óptimo de partículas. |

### 12. Consistencia en suelo seco

**Pregunta:** ¿El suelo es duro o friable al secarse?

| VALOR | CARACTERÍSTICAS                   |
|-------|-----------------------------------|
| 1     | Muy duro, difícil de romper.      |
| 5     | Medianamente duro.                |
| 10    | Blando y fácilmente desmenuzable. |

### 13. Consistencia en suelo húmedo

**Pregunta:** ¿El suelo es muy firme o friable?

| VALOR | CARACTERÍSTICAS                      |
|-------|--------------------------------------|
| 1     | Muy firme, resistente a la presión.  |
| 5     | Firme pero manejable.                |
| 10    | Friable, se desmenuza con facilidad. |

#### 14. Consistencia en suelo mojado

**Pregunta:** ¿El suelo se adhiere o es plástico?

| VALOR | CARACTERÍSTICAS                                 |
|-------|-------------------------------------------------|
| 1     | Muy plástico y adherente.                       |
| 5     | Moderadamente plástico, se deforma con presión. |
| 10    | No adherente, sin plasticidad.                  |

## 6. Interpretación de resultados

- **Promediar** los valores obtenidos en cada indicador (1 a 10).
- Representar los promedios en un **gráfico tipo radar o ameba**, donde los valores más altos indican mejor calidad del suelo.
- Evaluar la **calidad global**:
  1. **Alta (8–10)**: suelo sano, estructura estable y buena actividad biológica.
  2. **Media (5–7)**: suelo funcional, pero con limitaciones parciales.
  3. **Baja (1–4)**: suelo degradado o con riesgo de erosión, compactación o salinización.
- Formular **recomendaciones específicas**: incorporación de materia orgánica, control de erosión, mejora del drenaje, labranza mínima, entre otras.

## 7. Conclusión

La evaluación de la calidad del suelo en condiciones de campo constituye una herramienta esencial para la **gestión sostenible de los recursos edáficos**. Este método permite vincular la observación práctica con la toma de decisiones técnicas, promoviendo la participación de estudiantes, técnicos y agricultores en la conservación del suelo.

El conocimiento generado no solo orienta las labores agrícolas inmediatas, sino que fortalece la planificación territorial y la transición hacia sistemas productivos resilientes y ecológicamente equilibrados

# **CAPITULO VII: “MICROBIOLOGÍA DEL SUELO Y SU PAPEL EN LA NUTRICIÓN VEGETAL”**

## **1. Objetivos del capítulo:**

- Analizar el papel fundamental de los microorganismos del suelo en la nutrición vegetal: Este capítulo tiene como objetivo examinar cómo los microorganismos edáficos, a través de sus diversas funciones biogeoquímicas, contribuyen al ciclo de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo, azufre y carbono, impactando directamente en la fertilidad del suelo y en la salud de las plantas.
- Describir la diversidad microbiana del suelo y su relación con la calidad estructural y funcional del mismo: Identificar los principales grupos microbianos que habitan el suelo y cómo su interacción regula las propiedades físicas y químicas del sustrato, tales como la formación de agregados estables, la retención de agua y la resistencia a la erosión.
- Promover el conocimiento sobre las interacciones entre los microorganismos, el suelo y las plantas: Comprender cómo las bacterias, hongos, actinomicetos, y otros microorganismos influyen en la rizósfera, favoreciendo la disponibilidad de nutrientes, protegiendo las raíces de patógenos y mejorando el desarrollo vegetal, lo que constituye la base para una agricultura sostenible.
- Explorar las aplicaciones prácticas de la microbiología del suelo en la agricultura ecuatoriana: Proponer el uso de tecnologías biológicas como los biofertilizantes, compost y micorrizas, con énfasis en su adaptación a las condiciones edáficas de Ecuador, para mejorar la productividad agrícola y restaurar suelos degradados.
- Examinar la importancia de la microbiología del suelo en el contexto de la sostenibilidad y la resiliencia ecológica: Establecer cómo un manejo adecuado del microbiota del suelo puede contribuir a la mitigación del cambio climático, la conservación del carbono y el ciclo del agua, promoviendo una agricultura más ecológica y resistente a las alteraciones ambientales.

## **2. Introducción**

El suelo constituye el cimiento biológico de toda producción agrícola y el soporte físico y químico de la vida terrestre. Sin embargo, más allá de su apariencia mineral, el suelo es un ecosistema vivo, donde cada gramo puede albergar miles de millones de microorganismos que regulan procesos esenciales para la estabilidad y la productividad de los sistemas naturales y

agroecosistemas. Esta comunidad invisible, formada por bacterias, hongos, actinomicetos, algas, protozoos y arqueas, es el verdadero motor de los ciclos biogeoquímicos y el eje funcional de la **fertilidad del suelo**.

Comprender la **microbiología del suelo** no es un ejercicio meramente académico: constituye una herramienta estratégica para enfrentar los grandes desafíos contemporáneos de la agricultura, la degradación de los suelos, la pérdida de biodiversidad edáfica, el cambio climático y la dependencia creciente de fertilizantes químicos de síntesis industrial. En un contexto donde la sostenibilidad es una necesidad y no una opción, el conocimiento de los microorganismos edáficos permite diseñar prácticas de manejo que restablezcan los equilibrios ecológicos, aumenten la eficiencia del uso de los nutrientes y aseguren una productividad sostenida a largo plazo.

En el **Ecuador**, país de alta diversidad biológica y geopedológica, la relevancia de este conocimiento es aún mayor. Desde los suelos **andinos volcánicos**, ricos en materia orgánica y altamente reactivos, hasta los **suelos lateríticos amazónicos**, intensamente lixiviados, y los **arenosos costeros**, sujetos a erosión e intensa actividad agrícola, cada ecosistema presenta desafíos particulares que solo pueden comprenderse plenamente al analizar su **componente microbiano**. Las comunidades microbianas no solo reflejan el estado de salud del suelo, sino que lo determinan: intervienen en la **transformación del nitrógeno, fósforo y carbono**, en la **formación de agregados estables**, en la **retención de agua** y en la **protección fitosanitaria natural** de los cultivos.

El desconocimiento o subvaloración de la biota del suelo ha conducido a modelos de producción que tratan al suelo como un mero sustrato inerte. La sobreaplicación de fertilizantes nitrogenados y fosfatados, la labranza intensiva, la quema de residuos y el uso indiscriminado de agroquímicos han deteriorado la estructura y la actividad biológica, reduciendo su capacidad natural de autorregulación. Recuperar esa vitalidad implica **reintegrar la dimensión biológica** al manejo agrícola y reconocer que la fertilidad no depende únicamente de los nutrientes disponibles, sino de la **dinámica ecológica que los hace accesibles**.

La microbiología del suelo, por tanto, representa el puente entre la **agronomía tradicional** y la **ecología funcional**. El estudio de los microorganismos edáficos permite entender cómo los procesos invisibles — mineralización, fijación de nitrógeno, solubilización de fósforo, descomposición de materia orgánica o formación de micorrizas— se traducen en resultados visibles: suelos más fértiles, plantas más vigorosas y ecosistemas más resilientes. Asimismo, la aplicación práctica de estos

conocimientos posibilita el diseño de **Sistemas Integrados de Nutrición Vegetal (SINV)**, donde los biofertilizantes, compost y enmiendas biológicas complementan a los insumos minerales, optimizando la eficiencia y reduciendo el impacto ambiental.

Conocer la microbiología del suelo implica comprender la **vida subterránea** que sustenta la agricultura. Los microorganismos son los ingenieros invisibles del suelo: construyen su estructura, regulan sus flujos, sanan sus desequilibrios y garantizan su sostenibilidad. Su estudio no solo contribuye al conocimiento científico, sino que fundamenta una nueva forma de agricultura: una **agricultura biológica, regenerativa y climáticamente inteligente**, capaz de sostener la seguridad alimentaria sin comprometer los recursos naturales.

Por ello, este capítulo tiene como propósito no solo describir la diversidad microbiana y sus funciones, sino también destacar su papel decisivo en la **nutrición vegetal**, la **calidad del suelo** y la **resiliencia ecológica**. A través de este conocimiento, el estudiante, técnico o investigador podrá interpretar al suelo como un sistema vivo e integrarlo en estrategias de manejo que armonicen la productividad con la sostenibilidad ambiental.

### **3. Conceptos generales y diversidad microbiana**

El suelo no se limita a ser un sustrato inerte, sino que es un ecosistema biológicamente activo, en constante transformación. Su principal componente dinámico y sensible es el microbiota edáfico, un conjunto diverso de organismos microscópicos como bacterias, hongos, actinomicetos, algas, protozoos y arqueas. Estos organismos desempeñan un papel fundamental en todos los procesos que determinan la fertilidad, la estructura y la estabilidad del suelo. La microbiología del suelo, como disciplina científica, se encarga del estudio de estos microorganismos, sus interacciones con el entorno fisicoquímico, su ecología funcional y su influencia sobre el crecimiento y nutrición de las plantas.

Desde una perspectiva ecológica, el suelo se puede entender como una matriz tridimensional en la que los microorganismos habitan los espacios porosos llenos de agua y aire, adhiriéndose a las superficies de las partículas minerales o de materia orgánica. Estos microambientes, llamados microhábitats edáficos, ofrecen condiciones heterogéneas de oxígeno, humedad, pH y nutrientes, creando una diversidad biológica excepcional. De hecho, el suelo es considerado uno de los ecosistemas con mayor biodiversidad del planeta, superando incluso los océanos o los bosques tropicales en términos de riqueza microbiana.

El estudio de la microbiología del suelo es esencial para comprender cómo los microorganismos contribuyen a la salud y fertilidad del suelo, desempeñando un papel crucial en la transformación de la materia orgánica en nutrientes biodisponibles, la regulación del equilibrio químico del suelo y la estabilización de su estructura. En el contexto ecuatoriano, donde coexisten una gran variedad de suelos (montañosos, interandinos, costeros y amazónicos), el conocimiento de la biota edáfica es clave para el diseño de prácticas agrícolas sostenibles que no solo mejoren la productividad, sino que también minimicen el impacto ambiental y restauren suelos degradados por factores como la erosión, la acidez o la salinidad.

### 3.1 Conceptos básicos de microbiología del suelo

Los microorganismos del suelo son **organismos vivos de tamaño microscópico**, cuyo rango de dimensiones varía entre **0,2 y 100  $\mu\text{m}$** , invisibles al ojo humano, pero fundamentales para la vida vegetal. Un solo gramo de suelo fértil puede albergar más de **mil millones ( $10^9$ )** de células microbianas, representando miles de especies distintas. Esta enorme riqueza genética y metabólica convierte al suelo en un verdadero **banco biológico natural**, donde coexisten procesos químicos, físicos y biológicos de altísima complejidad.

Desde el punto de vista funcional, los microorganismos son los **principales mediadores de los ciclos biogeoquímicos** del carbono, nitrógeno, fósforo y azufre. A través de la respiración, la fijación, la mineralización y la descomposición, transforman elementos inmovilizados en formas biodisponibles para las plantas. Son también **bioingenieros**: producen sustancias adhesivas (polisacáridos y glicoproteínas) que cementan las partículas minerales, formando agregados estables, mejorando la aireación, la retención de agua y la resistencia del suelo frente a la erosión.

En términos ecológicos, el suelo actúa como un **microcosmos autosostenible** donde cada organismo cumple un papel funcional. La sinergia entre bacterias, hongos, actinomicetos, algas y protozoos mantiene el equilibrio edáfico. Cuando ese equilibrio se altera —por labranza intensiva, agroquímicos o pérdida de materia orgánica— la capacidad del suelo para regenerarse se ve seriamente comprometida.

### 3.2 Factores que determinan la actividad microbiana

La abundancia, diversidad y funcionalidad de los microorganismos del suelo dependen de la interacción de factores **físicos, químicos, biológicos y de manejo**, que pueden potenciar o limitar su actividad metabólica:

- **Contenido de materia orgánica:** Es la principal fuente de energía y nutrientes. Los residuos vegetales, estiércoles y compost alimentan el microbiota, estimulando la síntesis de enzimas degradadoras y la formación de humus. En los suelos volcánicos del Ecuador (como los Andisoles andinos), la alta retención de materia orgánica favorece comunidades microbianas estables y activas durante todo el año.
- **Humedad y aireación:** El agua es el medio donde ocurren los procesos metabólicos. Sin embargo, tanto el déficit como el exceso hídrico afectan la respiración microbiana. En zonas costeras húmedas, las bacterias anaerobias predominan temporalmente en suelos saturados, mientras que en suelos bien drenados prosperan bacterias y hongos aeróbicos.
- **pH del suelo:** Determina la composición microbiana. Los suelos neutros o ligeramente ácidos (pH 6–7) favorecen la máxima diversidad bacteriana, mientras que en suelos ácidos (pH < 5) aumentan hongos y actinomicetos acidófilos. En la Amazonía ecuatoriana, por ejemplo, los suelos lateríticos de baja fertilidad sustentan comunidades adaptadas a pH extremos.
- **Temperatura:** Controla las tasas de crecimiento y respiración. En el clima tropical del Ecuador, la actividad microbiana se mantiene elevada casi todo el año; sin embargo, en la Sierra alta las fluctuaciones térmicas pueden reducir la actividad biológica superficial durante las noches frías.
- **Manejo agronómico:** La rotación de cultivos, el tipo de labranza y la aplicación de agroquímicos influyen directamente sobre la biota. El laboreo intensivo rompe los microhábitats y expone la materia orgánica a la oxidación, reduciendo la población microbiana. En contraste, prácticas como el **laboreo mínimo** o el **uso de abonos orgánicos** promueven una microbiota más diversa y equilibrada.

### 3.3 Distribución espacial y vertical de los microorganismos

La distribución de los microorganismos en el suelo no es homogénea. La mayor concentración se encuentra en los **primeros 20–30 cm del perfil**, donde se acumula la materia orgánica y donde las raíces liberan **exudados radicales** ricos en azúcares, aminoácidos, ácidos orgánicos y hormonas vegetales. Esta zona, conocida como **rizósfera**, es un entorno biológicamente hiperactivo: la densidad microbiana puede ser **100 veces mayor** que en el suelo adyacente.

A medida que se profundiza, la disponibilidad de oxígeno y nutrientes disminuye, lo que reduce la biomasa y cambia la composición de las

comunidades. En suelos compactados o anegados, la falta de aire limita el desarrollo de hongos y bacterias aeróbicas, predominando especies anaerobias como *Clostridium* o *Desulfovibrio*.

En el Ecuador, los **patrones de distribución vertical** varían con la región natural:

- En los **suelos andinos**, ricos en cenizas volcánicas y materia orgánica, la colonización microbiana es profunda y diversa, con una notable presencia de actinomicetos y hongos micorrízicos.
- En los **suelos costeros**, más arenosos, la microbiota se concentra en los primeros centímetros del horizonte A, donde la humedad es variable.
- En los **suelos amazónicos**, la acidez y la lixiviación limitan la biomasa bacteriana, pero favorecen hongos y cianobacterias adaptados a ambientes húmedos y pobres en nutrientes.

### 3.4 Principales grupos de microorganismos del suelo

#### ***Bacterias***

Son los microorganismos más abundantes, responsables de la mayor parte de los procesos bioquímicos del suelo. Representan hasta **80 % de la biomasa microbiana total**. Cumplen funciones clave como la fijación biológica de nitrógeno atmosférico (*Rhizobium*, *Azospirillum*, *Azotobacter*), la solubilización de fósforo (*Pseudomonas*, *Bacillus*), la nitrificación (*Nitrosomonas*, *Nitrobacter*) y la degradación de residuos orgánicos. En la rizósfera, muchas especies bacterianas actúan como **PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria)**, produciendo fitohormonas, sideróforos y antibióticos naturales que estimulan el crecimiento vegetal y protegen contra patógenos.

#### ***Hongos***

Constituyen el grupo dominante en suelos ácidos o con alto contenido de residuos lignificados. Son los principales descomponedores de lignina, celulosa y cutina, materiales que pocas bacterias pueden degradar. Los **hongos micorrízicos arbusculares (HMA)** forman asociaciones simbióticas con más del 80 % de las especies vegetales, mejorando la absorción de fósforo y agua, y aumentando la tolerancia al estrés. Otros hongos, como *Trichoderma* o *Beauveria*, actúan como **biocontroladores** de enfermedades radiculares.

### ***Actinomicetos***

Intermedios entre bacterias y hongos, producen **micelios filamentosos** y poseen una elevada capacidad enzimática para degradar sustancias recalcitrantes. Su papel ecológico es doble: mineralizan materia orgánica difícil y secretan **antibióticos naturales** (estreptomicinas, tetraciclinas) que inhiben patógenos. En los suelos de montaña, los actinomicetos contribuyen notablemente a la **humificación** y al olor característico de “tierra fresca” por la liberación de **geosmina**.

### ***Algas y cianobacterias***

Son organismos fotosintéticos que colonizan la superficie del suelo, especialmente en ambientes húmedos o encharcados. Las **cianobacterias**, además de producir oxígeno, fijan nitrógeno atmosférico en formas asimilables. En sistemas degradados o deforestados, su presencia favorece la **formación de costras biológicas** que estabilizan el suelo y previenen la erosión.

### ***Protozoos y nematodos microscópicos***

Constituyen los **consumidores secundarios** del sistema edáfico. Se alimentan de bacterias y hongos, controlando sus poblaciones y liberando nutrientes en forma mineral. Su presencia indica un suelo equilibrado y funcional, con redes tróficas activas.

## **3.5 Hábitats edáficos y clasificación funcional**

### **Hábitats edáficos principales**

- **Rizósfera:** Es la zona más activa biológicamente, localizada en el entorno inmediato de las raíces. Aquí la densidad microbiana puede ser cien veces superior a la del suelo circundante. Los exudados radicales sirven de sustrato energético para bacterias y hongos benéficos, estableciéndose una intensa interacción suelo-raíz-microorganismo.
- **Microagregados y poros internos:** Son refugios protegidos donde los microorganismos sobreviven a la desecación y a los cambios térmicos. En ellos ocurre la formación de sustancias húmicas y la mineralización lenta de residuos orgánicos.
- **Superficies de partículas minerales y materia orgánica:** Actúan como zonas de adsorción para enzimas extracelulares, iones y polímeros, generando microambientes ricos en nutrientes que sustentan poblaciones estables de bacterias y actinomicetos.

## Clasificación funcional del microbiota del suelo

A continuación, se presenta una tabla que clasifica los principales grupos de microorganismos del suelo, su función en los ecosistemas edáficos y los beneficios agrícolas que aportan. Estos organismos desempeñan roles esenciales en los ciclos biogeoquímicos, la fertilidad del suelo y la salud de las plantas, contribuyendo a la disponibilidad de nutrientes, la mejora de la estructura del suelo y el control biológico de patógenos. La comprensión de estas funciones es clave para aplicar prácticas agrícolas sostenibles y promover una agricultura más resiliente y ecológicamente responsable.

**Tabla XX.** Clasificación funcional del microbiota del suelo

| GRUPO                          | FUNCIÓN PRINCIPAL                                                                   | EJEMPLOS CARACTERÍSTICOS                                                               | BENEFICIO AGRÍCOLA                                                          |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| <b>BACTERIAS</b>               | Fijación de N, solubilización de P, descomposición de residuos, regulación hormonal | <i>Rhizobium</i> ,<br><i>Azospirillum</i> ,<br><i>Bacillus</i> ,<br><i>Pseudomonas</i> | Aumentan la disponibilidad de nutrientes y estimulan el crecimiento vegetal |
| <b>HONGOS</b>                  | Descomposición de lignina y celulosa; simbiosis (micorrizas)                        | <i>Trichoderma</i> ,<br><i>Glomus</i> , <i>Aspergillus</i>                             | Mejoran la estructura del suelo y la absorción de fósforo                   |
| <b>ACTINOMICETOS</b>           | Humificación y producción de antibióticos                                           | <i>Streptomyces</i> ,<br><i>Micromonospora</i>                                         | Controlan patógenos y favorecen la estabilidad orgánica                     |
| <b>ALGAS Y CIANOBAACTERIAS</b> | Fijación de carbono y nitrógeno, protección superficial                             | <i>Anabaena</i> , <i>Nostoc</i> ,<br><i>Chlorella</i>                                  | Recuperan suelos degradados y aumentan la fertilidad natural                |
| <b>PROTOZOOS Y NEMATODOS</b>   | Regulación de bacterias y hongos, reciclaje trófico                                 | <i>Amoeba</i> , <i>Colpoda</i> ,<br>nematodos libres                                   | Mantienen el equilibrio ecológico y la mineralización eficiente             |

### 3.6 Importancia ecológica y agronómica de la diversidad microbiana

La diversidad microbiana constituye el **motor de la funcionalidad del suelo**. Un suelo con abundante biota posee alta capacidad de autorregulación, resiliencia ante disturbios, eficiencia en el uso del agua y nutrientes, y resistencia frente a patógenos. En cambio, un suelo empobrecido biológicamente se vuelve frágil, dependiente de insumos externos y vulnerable a la degradación.

Por ello, en la **agricultura moderna y sostenible del Ecuador**, comprender y manejar la microbiología del suelo no es un lujo académico, sino una necesidad práctica. Integrar biofertilizantes, compost, micorrizas y rotaciones que estimulen la vida del suelo permite **reducir fertilizantes químicos**, conservar carbono y restaurar la **salud edáfica** en zonas agrícolas sensibles como Manabí, Chimborazo o Sucumbíos.

## 4. FUNCIONES ECOLÓGICAS Y BIOQUÍMICAS DE LOS MICROORGANISMOS DEL SUELO

### 4.1 Introducción general

El funcionamiento de los ecosistemas edáficos depende en gran medida de los microorganismos, pues son los responsables de mantener el **flujo cíclico de los elementos esenciales para la vida**. A través de complejas reacciones bioquímicas, los microorganismos del suelo transforman y movilizan nutrientes que, de otro modo, permanecerían inmovilizados o inaccesibles para las plantas.

Estos procesos se integran en los llamados **ciclos biogeoquímicos**, donde la materia es continuamente reciclada entre los compartimientos biótico (seres vivos) y abiótico (atmósfera, agua y suelo). Entre ellos destacan los ciclos del **nitrógeno, fósforo, azufre y carbono**, considerados pilares de la fertilidad natural.

Cada ciclo involucra una red de organismos especializados (bacterias, hongos, actinomicetos y algas), cuyas interacciones determinan la **disponibilidad de nutrientes**, la **resiliencia del suelo**, y la **sostenibilidad de los sistemas agrícolas**. En ambientes tropicales como los del Ecuador, donde las altas temperaturas y la humedad aceleran la mineralización, el microbiota juega un papel aún más decisivo, regulando el equilibrio entre fertilidad, emisiones gaseosas y conservación de materia orgánica.

## 4.2 Ciclo del nitrógeno (N)

El **nitrógeno** es un elemento esencial en la estructura de proteínas, ácidos nucleicos, clorofila y coenzimas. Sin embargo, aunque el **N<sub>2</sub> atmosférico representa el 78 % del aire**, las plantas no pueden utilizarlo directamente. Su incorporación al ecosistema edáfico depende casi exclusivamente de los microorganismos, que lo transforman entre distintas formas químicas a través de un conjunto de procesos conocidos colectivamente como el **ciclo del nitrógeno**.

### a) Fijación biológica del nitrógeno (FBN)

Consiste en la conversión del nitrógeno gaseoso (N<sub>2</sub>) en amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), forma asimilable por las plantas. Este proceso es realizado por bacterias diazotróficas que poseen el complejo enzimático **nitrogenasa**, el cual requiere condiciones anaerobias y energía (ATP).

**Existen tres tipos principales:**

- **Simbióticas:**  
*Rhizobium*, *Bradyrhizobium* y *Sinorhizobium* establecen nódulos radiculares en leguminosas (soya, frijol, maní, caupí). En el Ecuador, estos sistemas son esenciales en la Sierra y la Costa, donde los cultivos leguminosos se utilizan en rotación con maíz o arroz para mejorar la fertilidad.
- **Asociativas:**  
*Azospirillum*, *Herbaspirillum* y *Burkholderia* viven en la rizósfera de gramíneas como maíz, caña o pastos, aumentando el crecimiento mediante la provisión parcial de N y fitohormonas.
- **Libres en el suelo:**  
*Azotobacter*, *Clostridium* y *Beijerinckia* fijan N de manera independiente, contribuyendo al fondo nitrogenado natural, especialmente en suelos con buena materia orgánica y aireación.

El aporte potencial de la FBN puede alcanzar entre **30 y 300 kg N/ha/año**, dependiendo del cultivo, el clima y el manejo.

### b) Amonificación

La materia orgánica —restos vegetales, estiércol, residuos microbianos— es degradada por bacterias heterótrofas (*Bacillus*, *Clostridium*, *Proteus*) y hongos (*Aspergillus*, *Penicillium*), liberando **amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)**. Este proceso convierte el nitrógeno orgánico en una forma inorgánica utilizable o transformable, constituyendo una etapa fundamental de reciclaje.

### **c) Nitrificación**

Es un proceso aeróbico en dos pasos, donde bacterias quimioautótrofas oxidan el amonio a nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y luego a nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ):

- *Nitrosomonas, Nitrospira*  $\rightarrow \text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$
- *Nitrobacter, Nitrospira*  $\rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$

El nitrato es la principal fuente de nitrógeno absorbida por las raíces. Sin embargo, su alta solubilidad implica riesgo de **lixiviación**, especialmente en suelos arenosos o con lluvias intensas, como los de la región Costa ecuatoriana.

### **d) Desnitrificación**

Bajo condiciones anaerobias, bacterias como *Pseudomonas*, *Bacillus* y *Paracoccus* reducen el nitrato a gases ( $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{N}_2$ ), que se liberan a la atmósfera, **cerrando el ciclo del nitrógeno**.

Aunque natural, este proceso puede causar pérdidas importantes de fertilizante nitrogenado y contribuir a la emisión de gases de efecto invernadero (óxido nitroso).

### **e) Importancia agronómica**

La gestión adecuada de estos procesos permite optimizar la fertilización. El uso combinado de **biofertilizantes fijadores de N**, el control de la **aireación y humedad**, y la aplicación racional de abonos minerales reducen pérdidas y mejoran la sostenibilidad.

En el contexto ecuatoriano, la integración de leguminosas en rotaciones agrícolas ha demostrado mejorar significativamente los niveles de N del suelo sin incrementar costos de insumos, siendo práctica clave en sistemas agroecológicos de la Sierra y Amazonía.

## **4.3 Ciclo del fósforo (P)**

El fósforo es otro macronutriente esencial, componente de ADN, ARN, ATP y fosfolípidos. Sin embargo, en la mayoría de los suelos tropicales se encuentra **altamente fijado o insoluble**, asociado a óxidos de hierro, aluminio o calcio, lo que limita su disponibilidad para las plantas.

### **a) Solubilización microbiana de fosfatos**

Diversas bacterias y hongos poseen la capacidad de liberar fósforo a partir de compuestos insolubles mediante la producción de **ácidos orgánicos**

**(cítrico, oxálico, glucónico) y enzimas fosfatasa.** Entre las especies más eficientes destacan:

- *Pseudomonas fluorescens*
- *Bacillus megaterium*
- *Aspergillus niger*
- *Penicillium bilaii*

Estos microorganismos no solo aumentan la disponibilidad de P, sino que también estimulan el crecimiento radicular y la absorción de otros nutrientes. En suelos andinos, con abundante hierro y aluminio, los solubilizadores desempeñan un papel determinante para la productividad agrícola.

### ***b) Mineralización del fósforo orgánico***

El P orgánico presente en residuos vegetales o en el humus es degradado por enzimas microbianas (fosfatasa, fitasa), transformándose en fosfatos inorgánicos asimilables. Esta etapa es fundamental en sistemas con fertilización orgánica o agroforestal.

### ***c) Micorrización y transferencia simbiótica***

Los **hongos micorrízicos arbusculares (HMA)** —géneros *Glomus*, *Gigaspora*, *Acaulospora*— extienden sus hifas en el suelo, explorando volúmenes de suelo inaccesibles para las raíces. Estas asociaciones simbióticas aumentan la absorción de fósforo, zinc y cobre, mejorando la tolerancia al estrés hídrico.

En suelos de Manabí y Loja, la inoculación micorrízica en cultivos de maíz y hortalizas ha mostrado incrementos de hasta **30 % en biomasa y producción**, incluso sin fertilizantes fosfatados adicionales.

## **4.4 Ciclo del azufre (S)**

El azufre participa en la formación de aminoácidos esenciales (cisteína, metionina), vitaminas y enzimas redox. En el suelo, circula entre las formas orgánica e inorgánica a través de procesos mediados por microorganismos.

### ***a) Mineralización y oxidación***

Los microorganismos descomponen la materia orgánica sulfurada (proteínas, coenzimas), liberando **sulfuro ( $H_2S$ )** o **sulfato ( $SO_4^{2-}$ )**. Bacterias del género *Thiobacillus*, *Beggiatoa* y *Desulfovibrio* desempeñan funciones opuestas:

- *Thiobacillus* oxida compuestos de azufre elemental o sulfurosos, generando sulfatos, en procesos aeróbicos.

- *Desulfovibrio* reduce sulfatos a sulfuros bajo condiciones anaerobias, presentes en suelos saturados o con mal drenaje.
- En suelos volcánicos del Ecuador, la presencia de azufre elemental es común, y la actividad de *Thiobacillus* contribuye a la formación de ácido sulfúrico, pudiendo acidificar el suelo si no se controla adecuadamente.

### ***b) Interacciones con otros ciclos***

El azufre está estrechamente vinculado al carbono y al nitrógeno. Por ejemplo, la mineralización de proteínas libera simultáneamente N y S, lo que influye en la relación C/N/S del suelo, un indicador de su estado trófico.

### ***c) Relevancia agronómica***

El manejo del azufre es esencial para cultivos de alto requerimiento (brásicas, cebolla, ajo). En Ecuador, el uso de **sulfato de amonio o yeso agrícola** no solo aporta azufre, sino que mejora la estructura de suelos sódicos. Los biofertilizantes con bacterias oxidantes de azufre representan una herramienta emergente en suelos con deficiencia de S.

## **4.5 Ciclo del carbono (C)**

El **carbono** es el elemento central de la vida y la base de la materia orgánica del suelo. Su ciclo refleja la interacción entre la fotosíntesis, la respiración y la descomposición, procesos regulados por microorganismos que determinan el almacenamiento o liberación de carbono.

### ***a) Descomposición de la materia orgánica***

La materia orgánica fresca (residuos vegetales y animales) es degradada por consorcios microbianos en varias etapas:

- **Descomposición inicial:** bacterias y hongos descomponen azúcares, proteínas y almidones.
- **Descomposición secundaria:** hongos ligninolíticos (*Trametes*, *Phanerochaete*) degradan lignina y celulosa.
- **Formación de humus:** actinomicetos y bacterias de descomposición lenta transforman compuestos intermedios en sustancias húmicas estables.

### ***b) Humificación***

La humificación genera **ácidos húmicos, fúlvicos y huminas**, responsables de la **estructura, retención de agua y capacidad de intercambio catiónico (CIC)**

del suelo. Esta fracción estable actúa como un reservorio de carbono y nutrientes a largo plazo.

### ***c) Respiración y balance de carbono***

La respiración microbiana libera CO<sub>2</sub> al ambiente. En suelos bien manejados, la tasa de emisión se equilibra con la captura de carbono por la vegetación. En cambio, la pérdida de cobertura vegetal o la labranza intensiva incrementan la oxidación y reducen el carbono orgánico total (COT), degradando la calidad del suelo.

### ***d) Microorganismos clave***

*Bacillus, Cellulomonas, Clostridium* (degradadores de celulosa)

*Aspergillus, Penicillium, Chaetomium* (hongos celulolíticos)

*Streptomyces* (formadores de humus y degradadores de lignina)

### ***e) Importancia en el cambio climático***

El suelo es el **mayor sumidero de carbono terrestre**, superando la biomasa vegetal y la atmósfera. Los microorganismos determinan si el carbono se almacena (secuestro) o se libera (emisión). Por ello, prácticas como el uso de compost, cultivos de cobertura y reducción del laboreo son estrategias efectivas para **mitigar el cambio climático**.

## **4.6 Integración ecológica de los ciclos biogeoquímicos**

Los ciclos del N, P, S y C no funcionan de forma aislada: están íntimamente conectados. La descomposición de la materia orgánica libera simultáneamente estos elementos, mientras que los procesos redox microbianos los interrelacionan en cadenas tróficas.

Un desequilibrio en cualquiera de ellos —por exceso de fertilización, deforestación o contaminación— repercute directamente en los demás. Por ejemplo, una deficiencia de carbono limita la fijación biológica de nitrógeno y la mineralización del fósforo.

La comprensión integral de estos procesos permite diseñar **sistemas de manejo integrado de nutrientes** (SINV) que optimicen la fertilidad natural, mantengan el carbono orgánico y reduzcan la dependencia de insumos químicos.

## 5. Conclusiones

- Los microorganismos son los motores invisibles de los ciclos biogeoquímicos.
- Su acción transforma elementos esenciales, garantizando la continuidad de la vida vegetal y la sostenibilidad del suelo.
- En el Ecuador, donde los suelos son diversos y sensibles, comprender y potenciar estas funciones ecológicas permite avanzar hacia una **agricultura regenerativa**, resiliente y de bajo impacto ambiental.

## INTERACCIONES SUELO-PLANTA MICROORGANISMO

### 1. Introducción

El suelo no es solo un soporte físico para las raíces, sino un ecosistema vivo donde las plantas interactúan de manera continua con millones de microorganismos. Estas interacciones conforman una red ecológica denominada **rizósfera**, la cual constituye la zona más activa del suelo desde el punto de vista biológico, químico y funcional.

En la rizósfera convergen **procesos de comunicación bioquímica, competencia por nutrientes y cooperación metabólica**, que determinan la salud y productividad de las plantas. La raíz, a través de sus exudados (azúcares, aminoácidos, ácidos orgánicos, fenoles), establece un “lenguaje químico” con el microbiota, seleccionando aquellas especies beneficiosas que promueven su crecimiento, facilitan la absorción de nutrientes y la protegen frente a patógenos.

Comprender estas relaciones simbióticas es esencial para transitar hacia una **agricultura sostenible y regenerativa**, en la que el manejo biológico de la fertilidad sustituya parcialmente a los insumos sintéticos. En los ecosistemas ecuatorianos —desde los suelos volcánicos andinos hasta los aluviales de la costa o los arcillosos amazónicos—, el conocimiento de las interacciones suelo-planta-microorganismo representa una herramienta estratégica para **restaurar suelos degradados, reducir costos de fertilización y mejorar la resiliencia frente al cambio climático**.

#### 1.1 La rizósfera: un ecosistema dinámico

La rizósfera se define como el volumen de suelo que rodea las raíces y que está influenciado directa o indirectamente por la actividad biológica de la planta. Esta zona, que puede extenderse desde unos pocos

milímetros hasta varios centímetros, alberga una densidad microbiana entre 10 y 100 veces superior a la del suelo no rizosférico.

### ***Exudados radiculares y selección microbiana***

Los exudados radiculares contienen una mezcla compleja de **compuestos carbonados (azúcares, polisacáridos), nitrogenados (aminoácidos, amidas) y fenólicos**, que sirven como sustrato energético para los microorganismos. Las plantas modulan la composición de estos exudados según su estado fisiológico, especie, edad y condiciones del suelo. De este modo, ejercen una **selección ecológica**, favoreciendo microorganismos beneficiosos como *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis* o *Glomus spp.* y excluyendo patógenos.

### ***Zonas funcionales de la rizósfera***

- **Endorrizósfera:** interior de los tejidos radiculares; donde se establecen microorganismos endófitos.
- **Ectorrizósfera:** superficie de las raíces y zona inmediata del suelo; lugar principal de adherencia microbiana y biofilm.
- **Rizoplan:** interfaz entre la raíz y las partículas de suelo, rica en mucílagos y compuestos orgánicos disueltos.

Cada una de estas zonas presenta gradientes de oxígeno, pH, humedad y concentración de nutrientes, lo que origina **microambientes especializados** donde se desarrollan comunidades microbianas diferenciadas.

## **1.2 Micorrizas: simbiosis funcional entre hongos y raíces**

Los **hongos micorrízicos arbusculares (HMA)** son uno de los componentes más importantes de la biota rizosférica. Forman asociaciones simbióticas con más del **80 % de las plantas terrestres**, incluyendo la mayoría de los cultivos agrícolas.

Estas simbiosis pertenecen al filo *Glomeromycota* e incluyen géneros como *Glomus*, *Gigaspora*, *Acaulospora* y *Scutellospora*.

### ***Mecanismo de simbiosis***

El hongo penetra en la raíz y desarrolla estructuras especializadas llamadas **arbúsculos** (sitios de intercambio de nutrientes) y **vesículas** (órganos de reserva).

A cambio de carbohidratos producidos por la planta, el hongo extiende su

micelio hacia el suelo, explorando volúmenes que las raíces por sí solas no alcanzarían.

### ***Funciones ecológicas***

- **Aumento de absorción de nutrientes:** especialmente fósforo (P), zinc (Zn) y cobre (Cu).
- **Mejora de la estructura del suelo:** las hifas fúngicas favorecen la agregación y la estabilidad del suelo.
- **Tolerancia al estrés hídrico y salino:** la micorrización mejora la eficiencia del uso del agua.
- **Protección frente a patógenos:** los HMA inducen resistencia sistémica mediante la activación de genes de defensa.

### ***Aplicaciones en la agricultura ecuatoriana***

En suelos volcánicos de la Sierra, la inoculación con *Glomus fasciculatum* ha demostrado incrementos significativos en el rendimiento de papa, maíz y haba.

En la región Costa, los HMA favorecen la recuperación de suelos degradados por monocultivos bananeros, mejorando la infiltración y reduciendo la erosión.

En la Amazonía, donde los suelos son ácidos y pobres en fósforo, la simbiosis micorrízica es esencial para el establecimiento de especies forestales y agroforestales nativas.

### ***Micorrizas ectotróficas y ericoides***

Aunque menos comunes en sistemas tropicales, las **ectomicorrizas** (propias de pinos y eucaliptos) y las **ericoides** (en arbustos del género *Ericaceae*) desempeñan funciones similares, siendo importantes en zonas de reforestación o restauración ecológica.

## **1.3 Bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR)**

Las **PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria)** constituyen un grupo funcional de bacterias que colonizan la rizósfera y estimulan el desarrollo vegetal mediante mecanismos directos e indirectos.

### ***Mecanismos directos***

#### **Producción de fitohormonas:**

- **Auxinas** (ácido indolacético): estimulan el crecimiento radicular.

- *Giberelinas* y *citoquininas*: promueven la división celular y el desarrollo del follaje. Ejemplo: *Azospirillum brasilense* incrementa la longitud radicular en maíz y arroz hasta un 30 %.

#### **Solubilización de fósforo y otros nutrientes:**

- *Pseudomonas putida* y *Bacillus megaterium* liberan ácidos orgánicos y fosfatasa que transforman P insoluble en formas disponibles.

#### **Fijación biológica de nitrógeno:**

- *Rhizobium*, *Azospirillum* y *Herbaspirillum* incorporan nitrógeno atmosférico al suelo.

#### **Producción de sideróforos:**

- Estas moléculas quelantes capturan hierro ( $\text{Fe}^{3+}$ ), haciéndolo accesible a las plantas y limitando su disponibilidad para patógenos.

#### ***Mecanismos indirectos***

- **Antagonismo frente a patógenos:** Muchas PGPR secretan antibióticos naturales (como la 2,4-diacetilfloroglucinol de *Pseudomonas fluorescens*) o enzimas líticas (quitinasas, proteasas) que inhiben hongos patógenos como *Fusarium* o *Rhizoctonia*.
- **Inducción de resistencia sistémica (ISR):** Al colonizar las raíces, las PGPR activan rutas hormonales en la planta (ácido jasmónico, etileno), generando un “estado de alerta” que la prepara para responder más eficazmente a futuros ataques.
- **Competencia por nichos y nutrientes:** La colonización efectiva de la rizósfera impide que microorganismos patógenos se establezcan.

#### ***Relevancia práctica***

El uso de inoculantes bacterianos se ha extendido en cultivos ecuatorianos de arroz, maíz, tomate y café, logrando reducciones de hasta **40 % en el uso de fertilizantes químicos**. Los biofertilizantes basados en *Bacillus subtilis* y *Azospirillum brasilense* presentan excelente adaptabilidad a las condiciones tropicales del país.

## 1.4 Biofilm radicular y comunicación microbiana

### *Formación del biofilm*

Los microorganismos rizosféricos no viven aislados, sino que se organizan en **biofilms**, estructuras tridimensionales formadas por comunidades microbianas inmersas en una matriz de exopolisacáridos. Este biofilm actúa como una **barrera protectora** frente a fluctuaciones de pH, humedad o tóxicos, y facilita la comunicación entre células.

### *Comunicación química: quorum sensing*

El **quorum sensing (QS)** es un mecanismo de comunicación basado en moléculas señal, como las **acil-homoserina lactonas (AHL)**, que permiten a los microorganismos detectar su densidad poblacional y coordinar comportamientos colectivos:

- Producción de antibióticos o enzimas.
- Formación de biofilm.
- Competencia o cooperación con otras especies.

En la rizósfera, el QS modula la expresión de genes relacionados con la colonización radicular, la producción de sideróforos y la resistencia al estrés. Las plantas, por su parte, pueden “interceptar” estas señales y ajustar su fisiología, participando activamente en el diálogo químico.

### *Biofilm y sostenibilidad*

La existencia de biofilms estables incrementa la **resiliencia microbiana**, permitiendo que comunidades benéficas persistan incluso tras aplicaciones moderadas de agroquímicos o en periodos de sequía. En programas de biofertilización, los consorcios microbianos encapsulados en matrices biofilmadas muestran mayor eficacia y duración que los inoculantes líquidos tradicionales.

## 1.5 Interacciones tripartitas: planta–hongo–bacteria

En muchos sistemas naturales y agrícolas, las interacciones no son binarias (planta–microorganismo), sino **tripartitas**. Por ejemplo, las bacterias PGPR pueden coexistir en las raíces micorrizadas, generando sinergias positivas:

- *Glomus intraradices* + *Bacillus subtilis* → incremento del crecimiento vegetal y absorción de P.
- *Rhizobium leguminosarum* + *Pseudomonas fluorescens* → aumento en la formación de nódulos y eficiencia simbiótica.

Estas asociaciones mejoran la estabilidad ecológica y permiten desarrollar **bioinoculantes multicomponentes**, cada vez más utilizados en programas de agricultura sostenible.

### 1.6 Relevancia ecológica y productiva

Las interacciones suelo–planta–microorganismo constituyen el **motor biológico de la productividad agrícola**. Un sistema radicular bien colonizado por micorrizas y bacterias benéficas:

- Mejora la estructura física del suelo.
- Incrementa la eficiencia del uso de nutrientes (EUN).
- Aumenta la tolerancia a sequía y salinidad.
- Reduce la incidencia de enfermedades.
- Disminuye el requerimiento de fertilizantes y pesticidas químicos.

El manejo racional de estas relaciones mediante la **biofertilización, rotación de cultivos, cobertura vegetal y reducción del laboreo** contribuye al mantenimiento de suelos vivos, fértiles y sostenibles.

## 2. Conclusiones

- La rizósfera es un ecosistema de alta complejidad y cooperación biológica.
- Las micorrizas y las bacterias promotoras del crecimiento vegetal son pilares de la fertilidad natural.
- El biofilm radicular y la comunicación microbiana permiten una regulación ecológica avanzada.
- En contextos tropicales como el ecuatoriano, estas interacciones son esenciales para el diseño de **sistemas integrados de nutrición vegetal (SINV)** y para la transición hacia una agricultura regenerativa.

## MICROORGANISMOS BENEFICIOSOS Y SU IMPACTO EN LA ESTRUCTURA DEL SUELO

### 1. Introducción

El suelo, como cuerpo natural complejo, mantiene su estabilidad y funcionalidad gracias a la acción conjunta de factores físicos, químicos y biológicos. Entre estos, los **microorganismos del suelo** juegan un papel central en la **formación y mantenimiento de la estructura edáfica**, al

intervenir en la agregación de las partículas minerales y en la generación de compuestos orgánicos cementantes.

Un suelo estructurado permite una **adecuada porosidad, aireación, infiltración y retención de agua**, lo que se traduce en un ambiente más favorable para el desarrollo radicular y la actividad biológica. Sin embargo, las prácticas agrícolas intensivas, el uso excesivo de maquinaria pesada y la aplicación indiscriminada de agroquímicos suelen degradar esta estructura, provocando compactación, encostramiento y pérdida de fertilidad.

Frente a estos procesos de degradación, los **microorganismos beneficiosos** —particularmente bacterias del género *Bacillus*, hongos del género *Trichoderma* y hongos micorrízicos arbusculares— emergen como **agentes bioestructurantes naturales**, capaces de regenerar y mantener la arquitectura del suelo mediante mecanismos bioquímicos y físicos.

### 1.1 Mecanismos microbianos de agregación del suelo

La agregación del suelo consiste en la unión de partículas minerales (arcilla, limo y arena) con materia orgánica para formar **micro y macroagregados**. Los microorganismos actúan en este proceso a través de tres mecanismos principales:

#### ***Producción de exopolisacáridos (EPS)***

Diversas bacterias y hongos secretan polisacáridos extracelulares —como glucanos, fructanos y glicoproteínas— que funcionan como **agentes cementantes naturales**.

Estos EPS recubren las partículas minerales y actúan como puentes coloidales, estabilizando los agregados frente a la acción del agua o el viento. Los *Bacillus spp.*, *Pseudomonas spp.* y *Rhizobium spp.* son conocidos por su alta capacidad de síntesis de EPS, que además mejoran la retención de agua y facilitan la adherencia de las raíces.

#### ***Desarrollo de redes fúngicas***

Los hongos filamentosos, especialmente *Trichoderma* y los hongos micorrízicos arbusculares (HMA), forman extensas **hifas miceliares** que enmarañan las partículas del suelo, actuando como una red física que refuerza los agregados. El micelio fúngico también libera compuestos orgánicos hidrofóbicos que incrementan la cohesión entre partículas, reduciendo la susceptibilidad a la erosión hídrica.

## ***Formación de biofilms microbianos***

Los **biofilms**, conformados por comunidades microbianas inmersas en matrices poliméricas, son estructuras tridimensionales altamente estables que recubren los microagregados. Estos biofilms actúan como un escudo frente a la disgregación, regulan la humedad local y favorecen el intercambio de gases. Su presencia mejora la **resiliencia estructural** del suelo ante los ciclos de humedecimiento y secado.

### **1.2 Microorganismos estructurantes clave**

#### ***Bacillus subtilis y especies afines***

*Bacillus subtilis*, *B. megaterium* y *B. amyloliquefaciens* son bacterias formadoras de esporas altamente resistentes que desempeñan un papel dual en la salud del suelo:

- **Síntesis de exopolisacáridos** que agregan las partículas finas.
- **Producción de fitohormonas** y enzimas que estimulan el crecimiento radicular.
- **Liberación de compuestos antibióticos**, protegiendo las raíces frente a patógenos.

En suelos volcánicos ecuatorianos (p. ej., provincia de Chimborazo), ensayos de inoculación con *B. subtilis* han mostrado un incremento del **20 % en la estabilidad de agregados** y una mejora en la infiltración de agua en más del 30 % respecto al control sin inoculación.

#### ***Trichoderma harzianum***

Este hongo saprófito y antagonista natural de patógenos no solo protege las raíces mediante competencia y micoparasitismo, sino que también **estimula la agregación edáfica**.

Produce **celulasas, quitinasas y ligninasas** que fragmentan residuos orgánicos, generando precursores húmicos que actúan como cementantes. Sus hifas estabilizan los microagregados y aumentan la macroporosidad, mejorando el drenaje y la aireación. En suelos arcillosos de la Amazonía ecuatoriana, la inoculación con *T. harzianum* ha reducido la densidad aparente de 1,35 a 1,18 g/cm<sup>3</sup> en menos de un ciclo agrícola.

#### ***Hongos micorrízicos arbusculares (HMA)***

Los HMA, particularmente los géneros *Glomus*, *Acaulospora* y *Gigaspora*, excretan una **glicoproteína conocida como glomalina**, considerada el “pegamento del suelo”.

La glomalina contribuye a:

- Aumentar la **cohesión y estabilidad estructural** de los agregados.
- Favorecer la **retención de carbono orgánico** y reducir la erosión.
- Mejorar la **capacidad de intercambio catiónico (CIC)** al aumentar la superficie activa de los complejos arcillo-húmicos.

Investigaciones realizadas por el INIAP (Ecuador) en cultivos de cacao y café muestran que los suelos con alta colonización micorrízica presentan **niveles de glomalina hasta 3 veces superiores** y una **mayor resistencia mecánica a la disgregación**.

### 1.3 Relación entre microbiología y estabilidad estructural

La estabilidad de agregados (EA) es uno de los indicadores más representativos de la calidad estructural del suelo, y está estrechamente vinculada con la actividad microbiana. Los microorganismos no solo son responsables de la formación de agregados, sino también de su renovación continua. A través de la producción de polisacáridos, glicoproteínas y compuestos húmicos, los microorganismos aseguran que los agregados permanezcan estables, incluso bajo condiciones de humedecimiento y secado. Este proceso de renovación biológica de los agregados contribuye a una estructura edáfica más sólida y resistente. A continuación, se presentan los efectos observados de la actividad microbiana sobre las propiedades físicas del suelo:

**Tabla XXx, Efectos de la actividad microbiana sobre las propiedades físicas del suelo**

| PROPIEDAD DEL SUELO              | EFFECTO MICROBIANO PRINCIPAL                    | RESULTADO OBSERVADO                |
|----------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------|
| DENSIDAD APARENTE                | Producción de EPS y aumento de macroporos       | Disminución (mejor aireación)      |
| INFILTRACIÓN Y RETENCIÓN DE AGUA | Formación de poros biogénicos                   | Aumento de capacidad hídrica       |
| RESISTENCIA A LA EROSIÓN         | Glomalina y redes fúngicas                      | Reducción del arrastre superficial |
| COMPACTACIÓN                     | Actividad enzimática y raíces finas estimuladas | Mayor resiliencia estructural      |
| CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA         | Porosidad biogénica continua                    | Incremento del flujo vertical      |

Este proceso demuestra cómo la actividad microbiana no solo influye en la química y biología del suelo, sino que tiene un impacto directo en sus propiedades físicas, como la aireación, la retención de agua, la resistencia a la erosión y la compactación. La gestión adecuada del microbiota edáfico es, por lo tanto, clave para mantener la estructura y la funcionalidad del suelo.

#### 1.4 Sinergias entre microorganismos estructurantes

En los ecosistemas naturales y agrícolas, los microorganismos no actúan de forma aislada. Las **interacciones sinérgicas** entre bacterias, hongos y micorrizas potencian los procesos de formación estructural. Por ejemplo:

- *Bacillus subtilis* estimula la germinación de esporas de *Glomus intraradices*, acelerando la micorrización.
- *Trichoderma harzianum* libera metabolitos que activan la síntesis de glomalina.
- Consorcios microbianos (*Bacillus* + *Trichoderma* + HMA) han demostrado en estudios de campo mejorar la **estabilidad de agregados hasta en 50 %** respecto al testigo sin inoculación.

Estos consorcios son la base de los **bioinoculantes multiespecíficos**, empleados actualmente en sistemas de producción sostenible y en proyectos de restauración de suelos degradados en Manabí, Los Ríos y Morona Santiago.

#### 1.5 Aplicaciones prácticas y manejo biológico de la estructura del suelo

##### ***Biofertilización estructural***

La inoculación con microorganismos estructurantes puede realizarse mediante:

- **Tratamiento de semillas:** inoculación de *Bacillus* o *Trichoderma* antes de la siembra.
- **Aplicación al suelo o al compost:** mejora la formación de agregados en etapas tempranas.
- **Co-inoculación con micorrizas:** garantiza una colonización más estable de la rizósfera.

##### ***Enmiendas biológicas complementarias***

El uso combinado de compost enriquecido con microorganismos y residuos vegetales mejora la capacidad estructurante. Los **compost bioactivados**

desarrollan biomasa microbiana capaz de inducir la formación de macroagregados duraderos.

### ***Recuperación de suelos degradados***

En áreas erosionadas o compactadas, la inoculación con *Trichoderma* y HMA, junto con cobertura vegetal, permite recuperar la estructura del suelo en menos de tres años, disminuyendo las pérdidas por escorrentía y aumentando el carbono orgánico total.

## **1.6 Indicadores biológicos de la calidad estructural**

La evaluación de la **calidad estructural del suelo** no puede limitarse a mediciones físicas tradicionales como densidad aparente o textura; debe incorporar indicadores **biológicos funcionales**, capaces de reflejar los procesos dinámicos que mantienen la estabilidad, fertilidad y resiliencia del sistema edáfico. Los **indicadores biológicos de la estructura del suelo** permiten cuantificar la contribución de la microbiota a la formación, mantenimiento y regeneración de los agregados, ofreciendo una visión integral del estado del suelo desde una perspectiva ecológica.

### ***Enfoque funcional de los bioindicadores***

Los bioindicadores reflejan la **actividad metabólica y ecológica** de los microorganismos, su papel en los ciclos biogeoquímicos y su interacción con la fracción mineral y orgánica. En particular, aquellos relacionados con la **formación de agregados estables** permiten establecer vínculos directos entre la biología del suelo y su estructura física.

En los suelos ecuatorianos —donde los contrastes climáticos entre la Sierra, Costa y Amazonía determinan distintas tasas de descomposición y mineralización— estos indicadores son herramientas clave para evaluar la efectividad de las prácticas de **manejo sostenible**, como el uso de biofertilizantes, compost o micorrizas.

### ***Estabilidad de agregados al agua (EAA)***

La estabilidad de agregados al agua (**EAA**) es uno de los indicadores más representativos de la calidad estructural del suelo. Evalúa la resistencia de los agregados a la desintegración cuando se exponen a la acción del agua, simulando los procesos naturales de humedecimiento.

La EAA está íntimamente ligada a la **actividad microbiana**, ya que los exopolisacáridos, las hifas fúngicas y la glomalina producida por hongos micorrízicos actúan como agentes cementantes. En estudios realizados por el INIAP (2022) en suelos de la Sierra central

(Chimborazo y Tungurahua), se observó que la inoculación con *Trichoderma harzianum* y consorcios de *Bacillus* aumentó la EAA en un 25–35 %, comparado con parcelas manejadas exclusivamente con fertilización química.

**Método de determinación:** La EAA se mide generalmente por el método de tamizado húmedo (Yoder, 1936), que clasifica los agregados según su resistencia a la desintegración. Se expresan los resultados como porcentaje de agregados estables o como **diámetro medio ponderado (DMP)**.

Valores de DMP superiores a 2 mm son característicos de suelos con elevada actividad biológica y buena estabilidad estructural, mientras que valores inferiores a 1 mm indican fragilidad agregada.

### ***Contenido de glomalina***

La **glomalina** es una glicoproteína producida exclusivamente por los hongos micorrízicos arbusculares (HMA). Su descubrimiento a finales de la década de 1990 revolucionó el concepto de estabilidad estructural del suelo, ya que se demostró que esta sustancia puede representar hasta el **5 % del carbono orgánico total** del suelo.

Su elevada **resistencia a la degradación** y su capacidad para unir partículas de arcilla y humus la convierten en un **biocemento natural**. En los suelos tropicales ecuatorianos, donde la erosión y el lavado son frecuentes, la glomalina actúa como un amortiguador físico-químico que protege la materia orgánica frente a la mineralización acelerada.

**Determinación y valores de referencia:** El contenido de glomalina se determina por extracción con citrato y posterior cuantificación colorimétrica (Wright & Upadhyaya, 1998).

- Valores > 1,5 mg/g de suelo: estructura altamente estable.
- Valores entre 0,8–1,5 mg/g: estabilidad moderada.
- Valores < 0,8 mg/g: suelos degradados o con baja actividad micorrízica.

En cultivos tropicales ecuatorianos como cacao (*Theobroma cacao*) y maíz (*Zea mays*), se han registrado aumentos del 20–25 % en la estabilidad estructural del suelo por cada incremento de 1 mg/g en glomalina.

### ***Actividad enzimática del suelo***

Las **enzimas del suelo** reflejan la intensidad de los procesos metabólicos y la capacidad del suelo para transformar la materia orgánica. Entre las más relevantes para la calidad estructural se destacan:

- **$\beta$ -glucosidasa:** cataliza la hidrólisis de celulosa y polisacáridos, facilitando la formación de compuestos húmicos que intervienen en la agregación.
- **Fosfatasa ácida:** libera fósforo orgánico disponible para las plantas, promoviendo el crecimiento radicular y, con ello, la exudación de compuestos que estimulan la actividad microbiana.
- **Ureasa y dehidrogenasa:** reflejan la intensidad de la respiración microbiana y la mineralización del nitrógeno.

En suelos enmendados con compost bioactivado, los incrementos de  **$\beta$ -glucosidasa** y **fosfatasa ácida** se correlacionan positivamente ( $r > 0,8$ ) con la estabilidad de agregados y la retención hídrica, evidenciando una relación directa entre la función biológica y la estructura física del suelo.

### ***Biomasa microbiana de carbono (Cmic)***

El carbono microbiano (Cmic) constituye una fracción activa y vital de la materia orgánica del suelo, esencial para la regeneración y estabilidad del ecosistema edáfico. Este indicador biológico responde de manera sensible a cambios en las prácticas de manejo y a disturbios en el suelo, sirviendo como un reflejo directo de su salud y funcionalidad. A continuación, se presenta la relación de los valores de Cmic con el estado biológico de diferentes tipos de suelos:

**Tabla xxx. Valores de Biomasa Microbiana de Carbono (Cmic) y su Relación con el Estado Biológico del Suelo**

| TIPO DE SUELO               | CMIC (MG C/KG SUELO) | ESTADO BIOLÓGICO |
|-----------------------------|----------------------|------------------|
| SUELO VOLCÁNICO (SIERRA)    | > 600                | Muy activo       |
| SUELO ALUVIAL (COSTA)       | 300–600              | Moderado         |
| SUELO LATERÍTICO (AMAZONÍA) | < 300                | Bajo o degradado |

El análisis de Cmic mediante el método de fumigación–incubación o fumigación–extracción (Vance et al., 1987) se ha convertido en una

herramienta indispensable para evaluar el **impacto de biofertilizantes y compost microbiano** en programas de manejo sostenible.

### ***Relación C/N microbiana***

La **relación carbono/nitrógeno (C/N)** microbiana expresa el equilibrio entre la materia orgánica disponible y la actividad metabólica de los microorganismos. Un valor equilibrado (entre 8 y 12) indica una comunidad microbiana estable, con una adecuada proporción entre síntesis y mineralización.

Cuando la relación C/N supera los 15, el sistema tiende a la inmovilización del nitrógeno y a una menor tasa de descomposición, afectando la dinámica estructural. En cambio, relaciones muy bajas (< 8) evidencian una descomposición excesiva y pérdida de materia orgánica.

En suelos ecuatorianos manejados bajo rotación maíz–leguminosa y aplicación de abonos verdes, se ha observado que mantener una C/N microbiana entre 10 y 12 favorece una mayor estabilidad de agregados y mejora el balance entre carbono activo y humificado.

### ***Integración de los indicadores: modelo conceptual***

Los indicadores biológicos no deben analizarse de forma aislada. La interdependencia entre la biomasa microbiana, la glomalina y la actividad enzimática conforma una **red funcional** que sostiene la calidad estructural del suelo.

Un modelo conceptual puede establecer la siguiente secuencia de interacción:

**Mayor biomasa microbiana (Cmic) → aumento en la producción de exopolisacáridos y glomalina → incremento de la estabilidad de agregados (EAA) → mejora de la porosidad y retención hídrica → mayor sostenibilidad agroecológica.**

Esta visión integradora es fundamental para el diseño de **Sistemas Integrados de Nutrición Vegetal (SINV)**, donde el manejo del microbiota del suelo se considera un componente activo de la estructura y fertilidad.

### ***Aplicaciones prácticas en Ecuador***

- En la **Sierra central**, los programas de biofertilización con *Glomus intraradices* y *Bacillus subtilis* en cultivos de papa y cebada han incrementado la estabilidad de agregados en 22–28 %.

- En la **Costa**, el uso de compost enriquecido con *Trichoderma* ha mejorado la macroporosidad de suelos arcillosos, reduciendo la compactación en 15 %.
- En la **Amazonía**, el manejo orgánico con abonos verdes y micorrizas ha duplicado el contenido de glomalina en suelos degradados por pastoreo intensivo.

## 2. Conclusión

La aplicación de indicadores biológicos de calidad estructural ofrece un enfoque integral para evaluar y gestionar la salud del suelo. Estos parámetros permiten comprender la **relación entre la vida microbiana y la arquitectura edáfica**, contribuyendo a la toma de decisiones en la agricultura sostenible. En el contexto ecuatoriano, donde la diversidad edafoclimática es amplia, la integración de estos indicadores en la evaluación agroecológica permitirá avanzar hacia un modelo de **rehabilitación y conservación de suelos** basado en la biología, la ciencia y la sostenibilidad.

## 3. Relevancia ecológica y sostenibilidad

### 3.1 Relevancia ecológica y sostenibilidad

La acción microbiana sobre la estructura del suelo no solo beneficia la productividad agrícola inmediata, sino que tiene consecuencias de gran escala en los **procesos ecológicos globales**, en la **resiliencia de los ecosistemas terrestres** y en la **sostenibilidad ambiental**. El microbiota edáfico actúa como un **sistema regulador invisible** que enlaza la fertilidad del suelo con los ciclos de carbono, agua y energía del planeta. En este contexto, la biología del suelo emerge como una herramienta estratégica para enfrentar tres desafíos contemporáneos: la **seguridad alimentaria**, la **mitigación del cambio climático** y la **restauración de ecosistemas degradados**.

#### *Captura y secuestro de carbono en el suelo*

La **materia orgánica del suelo (MOS)** es la principal reserva terrestre de carbono, superando incluso la cantidad contenida en la atmósfera y la vegetación combinadas. Sin embargo, su estabilidad depende en gran medida de la **estructura física del suelo** y del papel de los microorganismos en la formación de agregados.

Los **agregados estables** actúan como microcompartimentos que protegen la materia orgánica de la descomposición rápida, al aislarla del oxígeno y de las enzimas oxidativas. Este proceso, conocido como **secuestro físico del**

**carbono**, puede ser potenciado por la actividad de hongos micorrízicos y bacterias productoras de exopolisacáridos, que cementan las partículas del suelo.

En suelos volcánicos de la Sierra ecuatoriana, se ha demostrado que los sistemas agroforestales con leguminosas arbóreas y micorrizas arbusculares incrementan el carbono orgánico estable en más de **1,2 t C/ha/año**, contribuyendo significativamente a la mitigación de gases de efecto invernadero (Ministerio del Ambiente y Agua, 2023).

**Ecuación conceptual del secuestro microbiano de carbono:**  
Microorganismos activos → producción de glomalina + polisacáridos → formación de agregados → protección de la MOS → mayor captura de carbono estable.

### ***Mitigación del cambio climático***

El suelo es simultáneamente **fuentes y sumidero de carbono**. La degradación estructural —por labranza intensiva, erosión o uso excesivo de fertilizantes nitrogenados— acelera la liberación de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O, gases de efecto invernadero con elevado potencial de calentamiento global. En cambio, un suelo biológicamente activo y bien estructurado favorece la **retención y almacenamiento de carbono**, reduciendo la huella climática del agroecosistema.

Diversos estudios en la región Andina evidencian que el **manejo orgánico con biofertilizantes y compost microbiano** puede reducir las emisiones netas de CO<sub>2</sub> hasta en **40 %**, comparado con sistemas convencionales. Asimismo, los microorganismos desnitrificantes regulan el flujo de N<sub>2</sub>O, mientras que las bacterias metanotróficas contribuyen a la **oxidación del metano (CH<sub>4</sub>)**, mitigando su acumulación atmosférica.

Por tanto, promover la **microbiología funcional del suelo** no solo mejora la fertilidad agrícola, sino que constituye una herramienta directa de **acción climática basada en la naturaleza**.

### ***Control de la erosión y desertificación***

Una de las consecuencias más visibles de la degradación del suelo en Ecuador y América Latina es la erosión hídrica y eólica, que reduce drásticamente la capacidad productiva y la biodiversidad del paisaje. Los **microorganismos edáficos** desempeñan un papel fundamental en la prevención de estos procesos al:

- Estabilizar las partículas del suelo mediante sustancias cementantes (glomalina, mucílagos, exopolisacáridos).

- Incrementar la **porosidad y la infiltración de agua**, reduciendo el escurrimiento superficial.
- Favorecer el desarrollo radicular profundo, que actúa como anclaje físico y fuente de exudados orgánicos protectores.

En la provincia de Manabí, proyectos de restauración agrícola con biofertilizantes y cultivos de cobertura (*Mucuna pruriens*, *Canavalia ensiformis*) han demostrado reducciones de **hasta 60 % en pérdida de suelo por escorrentía**, validando el papel de la microbiología aplicada en la lucha contra la desertificación.

### ***Ciclo hidrológico y regulación hídrica del suelo***

El equilibrio estructural del suelo influye directamente en su **capacidad de retención e infiltración de agua**. Los poros creados por raíces, hifas fúngicas y biopolímeros microbianos facilitan el movimiento del agua y el aire, manteniendo una humedad edáfica más estable y reduciendo la evaporación superficial.

Esta función ecológica es esencial en zonas semiáridas o con lluvias estacionales, donde la pérdida de estructura conduce a compactación y escorrentía. Un suelo biológicamente activo actúa como **esponja natural**, almacenando agua en los agregados estables y liberándola gradualmente a las raíces durante los períodos secos.

En cultivos de maíz bajo manejo agroecológico en la costa ecuatoriana, la mayor actividad microbiana y glomalina se correlacionó con aumentos del **15–20 % en la capacidad de campo** y una reducción del **30 % en la densidad aparente** (UNESUM, 2024).

### ***Sostenibilidad productiva y energética***

Desde una perspectiva agronómica, la mejora de la estructura y funcionalidad biológica del suelo reduce significativamente la necesidad de **insumos externos**. Los microorganismos actúan como **biofábricas de nutrientes**, liberando y reciclando compuestos esenciales, lo que disminuye el uso de fertilizantes sintéticos y la energía asociada a su producción.

El mantenimiento de la fertilidad mediante procesos naturales:

- Disminuye los costos energéticos de la agricultura intensiva.
- Reduce la contaminación por lixiviación de nitratos y fosfatos.
- Aumenta la **eficiencia del uso del agua y de los nutrientes (EUN y EUNa)**.
- Prolonga la vida útil de los suelos agrícolas, evitando su degradación física y química.

En términos de sostenibilidad económica, los suelos con alta actividad microbiana pueden mantener rendimientos equivalentes a los sistemas convencionales, pero con un **20–35 % menos de costos energéticos y químicos**, según evaluaciones de la FAO (2022) en agroecosistemas tropicales.

### ***Resiliencia y adaptación al cambio climático***

La estructura microbiana del suelo actúa como un **mecanismo de resiliencia ecológica**, permitiendo que los sistemas agrícolas resistan y se recuperen de eventos climáticos extremos —sequías, inundaciones o aumentos de temperatura—.

Los suelos ricos en micorrizas y materia orgánica presentan:

- Mayor retención de humedad.
- Mejor capacidad de recuperación post-inundación.
- Actividad enzimática sostenida incluso bajo estrés térmico.

La **diversidad funcional microbiana** proporciona redundancia ecológica: si una especie desaparece, otra puede cumplir su función. Este principio, conocido como **resiliencia funcional**, es clave para mantener la estabilidad de los agroecosistemas en escenarios climáticos variables.

### ***Relevancia para los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)***

El estudio y manejo del microbiota del suelo contribuyen de manera significativa al cumplimiento de varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos en la Agenda 2030. Los procesos biológicos impulsados por los microorganismos del suelo, como la mejora de la fertilidad, el secuestro de carbono, la mejora de la eficiencia en el uso del agua y la restauración de suelos degradados, son fundamentales para avanzar hacia una agricultura más sostenible y una gestión ambiental más eficiente. A continuación, se presenta una tabla que muestra la contribución de la microbiología del suelo a metas específicas de los ODS

**Tabla XXX. Contribución de la Microbiología del Suelo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)**

| ODS                                           | META VINCULADA                           | CONTRIBUCIÓN MICROBIANA                           |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| <b>ODS 2: HAMBRE CERO</b>                     | 2.4 – Sistemas de producción sostenibles | Incrementa la productividad sin degradar el suelo |
| <b>ODS 13: ACCIÓN POR EL CLIMA</b>            | 13.2 – Integrar medidas de mitigación    | Secuestro de carbono y reducción de emisiones     |
| <b>ODS 15: VIDA DE ECOSISTEMAS TERRESTRES</b> | 15.3 – Lucha contra la desertificación   | Estabilidad estructural y recuperación del suelo  |
| <b>ODS 6: AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO</b>       | 6.4 – Uso eficiente del agua             | Mejora la infiltración y la retención hídrica     |

### ***Perspectivas de manejo sostenible***

El aprovechamiento del potencial microbiano del suelo requiere una visión sistémica que integre:

- **Manejo biológico de la fertilidad** (biofertilizantes, compost microbiano, micorrizas).
- **Rotaciones y policultivos** que estimulen la actividad biológica continua.
- **Reducción de la labranza y del uso de agroquímicos.**
- **Monitoreo de indicadores biológicos** como la glomalina, la biomasa microbiana y la actividad enzimática.

El desarrollo de **tecnologías locales de inoculación** basadas en microorganismos autóctonos puede representar una estrategia de soberanía agroecológica para Ecuador y América Latina, reduciendo la dependencia de insumos importados y potenciando la capacidad regenerativa del suelo.

## **4. Conclusión del epígrafe**

La microbiología del suelo representa un eje invisible pero determinante de la sostenibilidad planetaria. Su acción en la **formación de agregados**, la **retención de carbono**, la **regulación hídrica** y la **resiliencia agroecológica**

convierte al suelo en un aliado estratégico frente a los desafíos del siglo XXI. Reconocer y aprovechar estos procesos biológicos constituye el camino hacia una **agricultura regenerativa**, donde la productividad y la conservación de los recursos naturales no se oponen, sino que se integran bajo el principio de la **vida como fundamento de la fertilidad**.

## **Indicadores biológicos de calidad del suelo**

El monitoreo biológico del suelo constituye una herramienta esencial para evaluar su salud funcional, entendida como la capacidad del ecosistema edáfico de mantener procesos de soporte a la vida —producción vegetal, reciclaje de nutrientes, regulación hídrica y resiliencia frente a perturbaciones—.

A diferencia de los análisis químicos o físicos, los indicadores biológicos reflejan cambios tempranos en la calidad del suelo, ya que las comunidades microbianas responden rápidamente a las variaciones de manejo, clima o contaminación. En este sentido, su evaluación permite anticipar procesos de degradación o, por el contrario, confirmar la eficacia de estrategias de recuperación y manejo sostenible.

### **1. Principales indicadores biológicos**

La medición de indicadores biológicos proporciona una visión integral sobre la salud y funcionalidad del suelo. Estos parámetros permiten evaluar la actividad microbiana y su relación con los ciclos biogeoquímicos del nitrógeno, fósforo, carbono y otros nutrientes esenciales. A continuación, se presentan los indicadores más utilizados para evaluar la calidad estructural y biológica del suelo:

**Tabla XXXX. Indicadores Biológicos de la Calidad del Suelo**

| INDICADOR                                                          | DESCRIPCIÓN TÉCNICA                                                                                                                  | INTERPRETACIÓN ECOLÓGICA Y AGRONÓMICA                                                                                                             |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>RESPIRACIÓN BASAL DEL SUELO (MG CO<sub>2</sub>/G SUELO/DÍA)</b> | Mide la tasa de liberación de CO <sub>2</sub> por la respiración microbiana, reflejando la actividad metabólica global del suelo.    | Valores altos indican suelos activos y con buena disponibilidad de materia orgánica; valores bajos sugieren agotamiento biológico o compactación. |
| <b>BIOMASA MICROBIANA DE CARBONO (CMIC) (μG C/G SUELO)</b>         | Estima la fracción viva de la materia orgánica total. Se determina mediante fumigación-extracción o métodos de respirometría.        | Representa la capacidad del suelo de transformar y reciclar nutrientes; un descenso sostenido implica pérdida de vitalidad biológica.             |
| <b>ACTIVIDAD ENZIMÁTICA (UREASA, FOSFATASA, B-GLUCOSIDASA)</b>     | Indica la intensidad de los ciclos biogeoquímicos del N, P y C. Las enzimas reflejan la funcionalidad metabólica de las comunidades. | Alta en suelos fértiles y equilibrados; baja en suelos contaminados, salinos o sometidos a sobrelaboreo.                                          |
| <b>CONTENIDO DE GLOMALINA (MG/G SUELO)</b>                         | Proteína producida por hongos micorrízicos arbusculares, vinculada a la estabilidad estructural.                                     | Valores >1,5 mg/g se asocian a buena agregación y capacidad de retención hídrica.                                                                 |
| <b>ÍNDICE DE DIVERSIDAD MICROBIANA (SHANNON O SIMPSON)</b>         | Evalúa la riqueza y equitatividad de especies microbianas.                                                                           | Cuanto mayor sea el índice, mayor será la resiliencia funcional del suelo.                                                                        |
| <b>RELACIÓN C/N MICROBIANA</b>                                     | Expresa el equilibrio energético entre carbono disponible y nitrógeno asimilable.                                                    | C/N entre 8 y 12 indica equilibrio; valores extremos reflejan exceso de materia orgánica fresca o limitaciones de N.                              |

### 1.1 Aplicaciones prácticas

- En suelos tropicales agrícolas del Ecuador, la respiración basal promedio se sitúa entre 1,5 y 3,0 mg CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>, con incrementos superiores al 40 % cuando se aplican compost y biofertilizantes.
- En suelos andinos de altura, la actividad enzimática (particularmente la β-glucosidasa) se correlaciona con la estabilidad estructural y el carbono lábil, siendo un excelente indicador de restauración ecológica.
- Los índices biológicos integrados (IBQS) combinan varios parámetros en una sola escala cualitativa, clasificando el suelo como de calidad

alta, media o baja, lo cual facilita su aplicación en proyectos de manejo comunitario y certificación agroecológica.

## 2. Manejo biológico de la fertilidad

El manejo biológico de la fertilidad se basa en la activación de los procesos naturales de transformación, liberación y reciclaje de nutrientes mediante el uso de microorganismos benéficos. Este enfoque integra principios ecológicos con la tecnología agrícola moderna, buscando optimizar la productividad sin comprometer la sostenibilidad del recurso suelo.

### 2.1 Uso de inoculantes y biofertilizantes

Los biofertilizantes son productos biológicos que contienen microorganismos vivos capaces de colonizar la rizósfera, promover el crecimiento vegetal y mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes. Entre los más destacados se encuentran:

- *Azospirillum brasilense* y *Rhizobium* spp., fijadores biológicos de nitrógeno.
- *Bacillus megaterium* y *Pseudomonas fluorescens*, solubilizadores de fósforo.
- *Trichoderma* spp., agentes de biocontrol y mejoradores de la estructura del suelo.
- Micorrizas arbusculares del género *Glomus*, que amplían la red de absorción radicular.

**Ejemplo práctico:** En cultivos de maíz en la Costa ecuatoriana, la inoculación con *Azospirillum brasilense* permitió reducir hasta un 30 % la dosis de nitrógeno sintético, sin afectar el rendimiento, gracias a la fijación biológica y al aumento en la absorción de nitratos por las raíces.

### 2.2 Compost microbiano y bioactivadores

El compost microbiano o compost enriquecido es un material orgánico estabilizado mediante la inoculación de consorcios microbianos específicos —bacterias celulolíticas, hongos ligninolíticos y actinomicetos—.

Durante la maduración del compost, estos microorganismos:

- Aceleran la degradación de lignina, celulosa y hemicelulosa.
- Incrementan la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo.
- Mejoran la relación C/N final (de 30:1 a 12:1, óptima para uso agrícola).
- Aumentan la disponibilidad de nutrientes y la retención de agua.

En estudios realizados en suelos franco-arcillosos de Jipijapa, el uso de compost microbiano incrementó el fósforo disponible en un 18 % y la biomasa microbiana en un 25 % en comparación con compost tradicional (UNESUM, 2023).

### **2.3 Integración con fertilización química**

La combinación racional de biofertilizantes e insumos minerales constituye una estrategia sinérgica dentro de los Sistemas Integrados de Nutrición Vegetal (SINV). Estos sistemas equilibran la eficiencia inmediata de los fertilizantes químicos con la sostenibilidad ecológica de las fuentes biológicas.

Ventajas de la integración:

- Incremento de la eficiencia de uso del nitrógeno (NUE).
- Reducción de pérdidas por lixiviación o volatilización.
- Activación de la rizósfera y mejora del enraizamiento.
- Menor impacto ambiental y ahorro económico.

**Ejemplo experimental:** El uso conjunto de NPK 100 % + biofertilizante de *Bacillus* y *Azotobacter* permitió incrementar un 20 % la productividad del arroz y reducir en un 15 % la dosis total de fertilizante químico, con una mejor relación beneficio/costo (FAO, 2022).

### **2.4 Agricultura regenerativa y biointensiva**

El manejo biológico no se limita a la fertilidad, sino que forma parte de un modelo regenerativo de agricultura que busca restablecer los procesos ecológicos del suelo. Las prácticas recomendadas incluyen:

- Labranza mínima o cero labranzas.
- Rotaciones con leguminosas y cultivos de cobertura.
- Aplicación de lixiviados microbianos y té de compost.
- Monitoreo periódico de indicadores biológicos.

Este enfoque permite mantener la productividad a largo plazo y fortalecer la soberanía alimentaria en territorios rurales.

### 3. Estudio de caso: inoculación micorrízica en cultivos tropicales

#### 3.1 Contexto y justificación

En los sistemas tropicales húmedos del litoral ecuatoriano, el fósforo disponible suele ser limitado por la alta fijación en óxidos de hierro y aluminio. Esta restricción nutricional afecta especialmente a cultivos de interés económico como el cacao (*Theobroma cacao*), el banano y la yuca. La inoculación con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) se ha consolidado como una estrategia efectiva para superar esta limitación y mejorar simultáneamente la estabilidad estructural del suelo.

#### 3.2 Diseño experimental

- Localización: Cantón Jipijapa, provincia de Manabí.
- Cultivo: *Theobroma cacao* (variedad Nacional fino de aroma).
- Tratamientos:
  - T1: Control sin inoculación.
  - T2: Inoculación con *Rhizophagus irregularis* (Glomus intraradices).
  - T3: Inoculación + biofertilizante líquido (Bacillus + Azospirillum).
- Duración: Dos ciclos agrícolas consecutivos.

#### 3.3 Resultados principales

**Tabla xxx.** Resultados Principales de la Inoculación Micorrízica y Biofertilizantes

| PARÁMETRO EVALUADO           | CONTROL | HMA  | HMA +<br>BIOFERTILIZANTE |
|------------------------------|---------|------|--------------------------|
| CRECIMIENTO RADICULAR (%)    | —       | +25  | +34                      |
| RENDIMIENTO TOTAL (KG/HA)    | 1000    | 1180 | 1350                     |
| FÓSFORO DISPONIBLE (MG/KG)   | 12.5    | 17.8 | 20.6                     |
| CARBONO ORGÁNICO (%)         | 1.8     | 2.2  | 2.3                      |
| ESTABILIDAD DE AGREGADOS (%) | 45      | 55   | 61                       |

Estos resultados confirman el efecto sinérgico de la inoculación micorrízica y los biofertilizantes sobre la absorción de fósforo, la retención de agua y la formación de agregados estables.

### 3.4 Implicaciones agronómicas y ecológicas

- Aumento del rendimiento y vigor vegetal sin incrementar el uso de fertilizantes químicos.
- Mejora de la calidad estructural y de la porosidad del suelo.
- Mayor secuestro de carbono orgánico en el perfil superficial.
- Reducción del impacto ambiental por lixiviación de fósforo y nitratos.

En términos de sostenibilidad, los sistemas micorrízicos integrados demostraron un ahorro energético del 25 % respecto al sistema convencional, consolidándose como una tecnología agroecológica replicable para zonas tropicales del Ecuador y América Latina.

## 4. Conclusiones

- El microbiota del suelo constituye el eje biológico de la fertilidad natural y la sostenibilidad agrícola.
- Su manejo adecuado permite reducir costos de fertilización, mejorar la eficiencia del uso de nutrientes y conservar la estructura edáfica.
- La integración de prácticas biológicas con tecnologías modernas (biofertilizantes, compostaje controlado, sensores de actividad microbiana) representa una vía efectiva para avanzar hacia una **agricultura regenerativa** y resiliente en los ecosistemas ecuatorianos.

# CAPÍTULO VIII: MANEJO DIGITAL DEL SUELO Y AGRICULTURA DE PRECISIÓN

## 1. Introducción a la agricultura digital

La agricultura contemporánea atraviesa una transformación profunda impulsada por la digitalización, la automatización y la inteligencia artificial. Este proceso, conocido como Agricultura 4.0, representa una evolución desde los sistemas convencionales basados en la experiencia empírica hacia modelos data-driven, donde la toma de decisiones se apoya en información precisa, en tiempo real y geoespacialmente referenciada.

El suelo —base física y biológica de la producción— se convierte en un sistema inteligente, capaz de ser monitoreado, modelado y gestionado mediante herramientas digitales que optimizan su uso y conservación.

### 1.1 De la agricultura tradicional a la Agricultura 4.0

La historia reciente del agro puede dividirse en cuatro grandes etapas tecnológicas:

| ETAPA                  | DENOMINACIÓN                             | CARACTERÍSTICAS                                                                                                 |
|------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>AGRICULTURA 1.0</b> | Manual o tradicional                     | Basada en la fuerza humana y animal, sin mecanización ni insumos externos.                                      |
| <b>AGRICULTURA 2.0</b> | Revolución verde (mediados del siglo XX) | Introducción de fertilizantes sintéticos, agroquímicos, mecanización y riego.                                   |
| <b>AGRICULTURA 3.0</b> | Agricultura de precisión                 | Uso de GPS, sensores y mapas de rendimiento para optimizar la aplicación de insumos.                            |
| <b>AGRICULTURA 4.0</b> | Agricultura digital e inteligente        | Integración de inteligencia artificial, robótica, Big Data, Internet de las Cosas (IoT) y sistemas predictivos. |

La **Agricultura 4.0** no sustituye al conocimiento agronómico, sino que lo amplifica mediante el análisis masivo de datos provenientes de sensores de

suelo, estaciones meteorológicas, drones y satélites. Esta integración de información permite generar **modelos de fertilidad, predicción de rendimientos, gestión hídrica y sostenibilidad ambiental**, convirtiendo al suelo en un sistema monitoreado digitalmente.

## **1.2 Conceptos fundamentales: Smart Farming, IoT y automatización**

El término **Smart Farming** o *agricultura inteligente* describe un enfoque tecnológico en el cual la conectividad, la analítica avanzada y la automatización se aplican a todas las etapas del proceso productivo. En este contexto, el **Internet de las Cosas (IoT)** conecta sensores, máquinas y plataformas digitales, permitiendo una **retroalimentación continua** entre los datos obtenidos en campo y las decisiones de manejo agronómico.

Entre los elementos clave de la agricultura digital se destacan:

- **Sensores de campo:** miden en tiempo real variables del suelo (pH, humedad, conductividad eléctrica), del ambiente (temperatura, radiación, humedad relativa) y del cultivo (índices de vegetación).
- **Drones y satélites:** generan imágenes multiespectrales que detectan estrés hídrico, deficiencias nutricionales o compactación del suelo antes de que sean visibles a simple vista.
- **Sistemas de apoyo a la decisión (DSS):** integran datos de distintas fuentes (clima, suelo, rendimiento, topografía) y recomiendan dosis óptimas de fertilización o riego.
- **Automatización y robótica agrícola:** permiten sembrar, aplicar insumos y cosechar con mínima intervención humana, reduciendo errores y costos.

La interconexión entre estos componentes da lugar a **ecosistemas agrícolas digitales**, donde los datos reemplazan la intuición como base para la gestión de la fertilidad y el uso racional del suelo.

## **1.3 Beneficios agronómicos, económicos y ambientales**

El manejo digital del suelo genera una serie de ventajas que impactan directamente en la sostenibilidad de los sistemas agrícolas:

### **Beneficios agronómicos**

- Mayor precisión en la aplicación de nutrientes y agua, evitando excesos o deficiencias.
- Diagnóstico temprano de compactación, erosión o salinidad mediante sensores y teledetección.

- Mejora de la uniformidad productiva y la calidad del cultivo.
- Integración con modelos de predicción climática para ajustar las prácticas agrícolas a eventos extremos.

### **Beneficios económicos**

- Reducción de costos operativos por uso eficiente de fertilizantes y agroquímicos.
- Aumento del rendimiento por hectárea y del retorno sobre la inversión (ROI).
- Acceso a certificaciones digitales de sostenibilidad y trazabilidad (por ejemplo, Global GAP, ISO 14046).
- Valor agregado en mercados que priorizan la agricultura inteligente y baja en emisiones.

### **Beneficios ambientales**

- Disminución de la contaminación por lixiviación de nitratos y fosfatos.
- Ahorro de agua mediante fertirriego controlado por sensores.
- Captura de carbono y mantenimiento de la biodiversidad edáfica.
- Conservación de suelos mediante labranza mínima y monitoreo continuo de su estructura.

En síntesis, la digitalización del suelo favorece una **transición hacia la sostenibilidad basada en datos**, donde la eficiencia y la conservación se integran en un mismo modelo de producción.

## **1.4 Grado de adopción tecnológica en América Latina y el Ecuador**

La incorporación de la agricultura digital en América Latina ha avanzado de forma desigual, reflejando las diferencias en infraestructura tecnológica, acceso a capital y formación técnica.

- **Brasil** lidera la región con más de 9 millones de hectáreas bajo monitoreo satelital y sistemas integrados de gestión agrícola (*Embrapa Digital Agriculture*).
- **México y Chile** destacan por el uso de sensores y plataformas IoT en cultivos de alto valor (vid, aguacate, arándano).
- **Argentina** ha desarrollado robustos startups agtech, como *FieldView* y *Auravant*, centradas en mapeo de suelos y predicción de rendimiento.
- En el **Ecuador**, la adopción ha crecido significativamente desde 2018, impulsada por proyectos públicos y privados orientados a la

**digitalización de cadenas productivas.** Entre los avances más notorios se destacan:

- Uso de **drones multiespectrales** en la costa para la detección de estrés nutricional en banano, cacao y palma.
- Implementación de **sensores de humedad e IoT** en los valles interandinos para fertirriego en tomate y flores.
- Monitoreo de fertilidad y erosión en cuencas agrícolas de Manabí y Loja mediante **SIG y modelos digitales del terreno (MDT)**.
- Aplicación de **modelos de aprendizaje automático** para predicción de rendimiento de maíz en sistemas de agricultura familiar en Los Ríos y Santo Domingo.

A pesar de estos avances, persisten desafíos estructurales:

- Escasa conectividad rural y brechas digitales.
- Costos iniciales elevados de equipos y licencias.
- Falta de capacitación técnica en procesamiento de datos y mantenimiento de sensores.

Sin embargo, el contexto actual muestra un **creciente interés institucional y académico** por consolidar la transición hacia sistemas agrícolas inteligentes, donde el manejo digital del suelo se convierte en pilar de la sostenibilidad y la productividad nacional.

## **2. Sistemas de Información Geográfica (SIG) aplicados al suelo**

El uso de los **Sistemas de Información Geográfica (SIG)** constituye uno de los pilares de la agricultura de precisión moderna. Estas herramientas permiten **integrar, analizar y visualizar información espacial** relacionada con las propiedades del suelo, el clima, el relieve y el rendimiento de los cultivos, facilitando la toma de decisiones basadas en evidencias georreferenciadas. En el contexto del manejo digital del suelo, los SIG no solo sirven para almacenar datos, sino para **modelar procesos edáficos y ambientales**, detectar patrones espaciales y optimizar la distribución de los recursos en función de la variabilidad natural del terreno.

### **2.1 Georreferenciación de unidades edáficas**

La **georreferenciación** es el punto de partida de cualquier análisis espacial. Consiste en asignar coordenadas precisas (latitud y longitud) a los puntos de muestreo del suelo, de manera que toda la información edáfica (textura, pH, materia orgánica, nutrientes, densidad aparente, etc.) quede integrada en un sistema de coordenadas común.

En los estudios de suelos tradicionales, los puntos de muestreo se tomaban de manera sistemática o aleatoria, sin necesariamente considerar su localización exacta. Sin embargo, con la digitalización, cada muestra se **vincula a un punto GPS**, lo que permite construir **mapas de variabilidad espacial** con alta resolución.

Ventajas del uso de georreferenciación en suelos:

- Permite **comparar resultados a lo largo del tiempo**, facilitando el monitoreo de la degradación o mejora del suelo.
- Facilita la **integración con sensores remotos** y modelos digitales del terreno (MDT).
- Permite la **delimitación de unidades edáficas homogéneas**, esenciales para definir zonas de manejo específico (ZME).

En Ecuador, los proyectos del **MAG** y el **INAMHI** han aplicado esta metodología en programas de **cartografía edáfica de precisión**, especialmente en Manabí, Los Ríos y Chimborazo, donde la variabilidad topográfica condiciona la productividad agrícola.

## 2.2 Mapeo de fertilidad, texturas y propiedades fisicoquímicas

Los SIG permiten **mapear la distribución espacial** de las propiedades del suelo mediante interpolaciones estadísticas o geoestadísticas (como *Kriging*, *IDW* o *Spline*). Cada propiedad edáfica (pH, MO, N, P, K, CIC, textura, densidad aparente, conductividad eléctrica, entre otras) puede ser representada mediante **cartas de fertilidad**, lo que posibilita un manejo diferenciado de los insumos.

**Ejemplo práctico:**

- En un lote de maíz de 50 hectáreas: Los análisis de laboratorio indican un pH entre 5.2 y 6.8, y fósforo disponible entre 3 y 18 mg/kg.

Con esta información georreferenciada, el SIG genera **mapas de interpolación** que permiten aplicar enmiendas calcáreas y fertilizantes **de forma variable**, reduciendo costos hasta un 25 % y evitando impactos ambientales.

La **cartografía digital del suelo (CDS)** integra múltiples capas de información:

- **Propiedades químicas:** pH, N, P, K, MO, CIC.
- **Propiedades físicas:** textura, densidad aparente, conductividad hidráulica.
- **Propiedades biológicas:** biomasa microbiana, glomalina, actividad enzimática.

Esta integración produce modelos tridimensionales de fertilidad que reflejan la heterogeneidad real del terreno, base del concepto de **agricultura sitio-específica**.

### 2.3 Uso de índices espectrales (NDVI, NDRE) y modelos digitales del terreno (MDT)

Los **índices espectrales** obtenidos mediante drones o satélites constituyen herramientas poderosas para relacionar el estado del cultivo con las condiciones del suelo. El **NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)**, calculado a partir de las bandas del rojo (R) y del infrarrojo cercano (NIR), se expresa como:

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$$

Valores cercanos a 1 indican vegetación densa y saludable, mientras que valores bajos (<0,3) reflejan estrés hídrico, deficiencia de nutrientes o compactación del suelo. En cambio, el **NDRE (Normalized Difference Red Edge Index)**, basado en la banda *red-edge*, es más sensible a variaciones en la concentración de clorofila y es ideal para **monitorear deficiencias de nitrógeno** en etapas tempranas del cultivo.

#### Aplicaciones prácticas:

- Detección temprana de zonas con estrés nutricional.
- Identificación de compactación o drenaje deficiente.
- Estimación del rendimiento potencial mediante correlaciones con biomasa.

Los **Modelos Digitales del Terreno (MDT)** complementan este análisis al representar la morfología superficial del suelo mediante curvas de nivel, pendientes y orientación (aspecto).

#### Estos modelos son esenciales para:

- Evaluar **erosión potencial** y escorrentía.
- Planificar **sistemas de riego y drenaje**.
- Diseñar estrategias de **conservación de suelos**.

En el Ecuador, el uso combinado de NDVI, NDRE y MDT ha permitido **identificar microzonas de baja productividad** en cultivos de banano, arroz y café, optimizando la aplicación de fertilizantes y enmiendas calcáreas.

## 2.4 Plataformas y herramientas SIG más utilizadas

Las tecnologías disponibles para el análisis espacial del suelo se dividen en dos grupos: **software de escritorio** y **plataformas en la nube**.

### a) Software de escritorio

- **QGIS** (Open Source): herramienta gratuita ampliamente usada en universidades y proyectos públicos; permite análisis espaciales, interpolaciones y modelado raster/vectorial.
- **ArcGIS Pro (Esri)**: software comercial con gran capacidad de modelado y análisis 3D; integra módulos de *Geostatistical Analyst* para cartografía de fertilidad.

### b) Plataformas en la nube y agtech

- **Google Earth Engine (GEE)**: plataforma de análisis geoespacial basada en la nube, ideal para procesar grandes volúmenes de imágenes satelitales (Sentinel-2, Landsat).
- **AgLeader® y Trimble Ag Software**: permiten la gestión de maquinaria agrícola, aplicación variable de insumos y monitoreo de rendimiento.
- **GeoPard Agriculture®**: plataforma especializada en análisis de suelos, integración de imágenes NDVI y creación de zonas de manejo específicas.
- **DroneDeploy®**: facilita la creación de mapas de alta resolución mediante drones, integrando los datos en sistemas GIS o de IA agrícola.

Estas herramientas permiten que el productor o investigador genere **mapas de fertilidad, erosión y textura**, automatice cálculos de balance de nutrientes y defina **prescripciones de aplicación variable**, base de la agricultura de precisión moderna.

## 2.5 Aplicaciones en Ecuador y proyección futura

En Ecuador, varias iniciativas han incorporado SIG en la gestión del suelo:

- **MAG – Proyecto de Suelos y Fertilidad (2023)**: elaboración de mapas digitales de fertilidad de 24 provincias con base en muestreos georreferenciados y análisis multivariante.
- **INIAP – Programa de Agricultura de Precisión**: uso de QGIS y NDVI para zonificación de cultivos de cacao y maíz en Los Ríos y Manabí.

- **Universidades (ESPOL, UNESUM, ESPE):** aplicación de modelos digitales del terreno para determinar riesgo de erosión y capacidad de uso agrícola.
- **Empresas privadas (AGRODATA, SmartField):** integración de plataformas IoT con SIG para monitorear humedad y CE del suelo en tiempo real.

El futuro de los SIG agrícolas en Ecuador se orienta hacia la **automatización del análisis espacial** mediante inteligencia artificial y algoritmos de aprendizaje profundo (Deep Learning), que permitirán **predecir la dinámica del suelo** (humedad, erosión, salinidad, carbono) a partir de grandes volúmenes de datos satelitales y de campo.

### **Sensores y tecnologías emergentes**

- Sensores *in situ* de conductividad eléctrica (EC), humedad, pH y temperatura.
- Drones multiespectrales y cámaras hiperespectrales.
- Imágenes satelitales (Sentinel, Landsat) y teledetección para agricultura.
- Integración con sistemas IoT y nubes de datos.

## **3. Modelos predictivos y Big Data agrícola**

El crecimiento exponencial de los datos generados por sensores, estaciones meteorológicas, satélites y dispositivos IoT ha dado origen al concepto de **Big Data agrícola**, una herramienta esencial para comprender y anticipar el comportamiento del suelo, los cultivos y el clima. La integración de estos datos masivos con **modelos predictivos basados en inteligencia artificial (IA)** permite transformar la agricultura en una ciencia de decisiones precisas, donde cada acción se fundamenta en evidencia empírica y análisis automatizados.

En el contexto ecuatoriano, donde los sistemas agrícolas son heterogéneos —desde los cultivos de montaña en los Andes hasta las plantaciones tropicales costeras y amazónicas—, la aplicación del Big Data ofrece una oportunidad estratégica para **optimizar la fertilidad del suelo, reducir pérdidas y aumentar la resiliencia frente al cambio climático**.

### **3.1 Inteligencia artificial para predicción de rendimiento y diagnóstico nutricional**

La **inteligencia artificial (IA)** permite procesar grandes volúmenes de datos edáficos, climáticos y fisiológicos para modelar relaciones complejas entre variables. En lugar de depender exclusivamente de muestreos físicos, los

modelos predictivos aprenden patrones a partir de datos históricos y en tiempo real, proporcionando diagnósticos rápidos y precisos.

**Entre sus aplicaciones destacan:**

- **Predicción del rendimiento agrícola**, combinando datos de textura, materia orgánica, humedad y NDVI.
- **Diagnóstico nutricional** mediante correlaciones entre deficiencias foliares y parámetros espectrales.
- **Recomendaciones de fertilización de precisión**, ajustadas a la variabilidad espacial del terreno.
- **Monitoreo de la degradación del suelo**, detectando tendencias de salinización, compactación o erosión.

Los modelos de IA permiten reducir los costos de análisis de laboratorio, anticipar escenarios de producción y apoyar decisiones de manejo sitio-específicas.

### **3.2 Principales métodos de modelado predictivo**

Los algoritmos más empleados en la agricultura digital para modelar suelos y fertilidad son los siguientes:

#### ***a) Regresión múltiple y modelos lineales generalizados (GLM)***

Utilizados para describir la relación entre una variable dependiente (por ejemplo, rendimiento del cultivo) y varios predictores (pH, textura, NDVI, precipitación). Aunque su interpretación es sencilla, asumen relaciones lineales, por lo que su capacidad predictiva puede ser limitada en sistemas edáficos complejos.

#### ***b) Random Forest (RF)***

Es un método de **aprendizaje supervisado** basado en la combinación de múltiples árboles de decisión. Random Forest destaca por su capacidad de manejar grandes volúmenes de datos, detectar interacciones no lineales y estimar la importancia relativa de cada variable.

- **Aplicación típica:** predicción del contenido de carbono orgánico o fósforo disponible en función de datos espectrales, topográficos y climáticos.

En estudios realizados en la **costa de Ecuador**, RF ha alcanzado **precisiones superiores al 85 %** en la estimación del carbono orgánico del suelo (SOC) a partir de imágenes Sentinel-2 y datos de campo calibrados.

### ***c) Máquinas de Vectores de Soporte (SVM)***

SVM es un método poderoso para **clasificación y regresión no lineal**, que utiliza hiperplanos para separar clases o definir funciones de predicción. En suelos, se emplea para:

- Clasificar tipos edáficos a partir de firmas espectrales.
- Estimar contenido de humedad y salinidad.
- Predecir zonas de alta y baja productividad. En ambientes tropicales ecuatorianos, donde la variabilidad microclimática es elevada, los modelos SVM han demostrado alta estabilidad frente a ruidos y datos incompletos.

### ***d) Redes neuronales artificiales (RNA)***

Inspiradas en el cerebro humano, las RNA son capaces de **aprender relaciones altamente complejas** entre variables. Mediante capas de neuronas interconectadas, estos modelos ajustan pesos que minimizan el error de predicción.

En agricultura se usan para:

- Predecir rendimientos de maíz, arroz o banano a partir de datos climáticos y NDVI.
- Modelar la dinámica del nitrógeno disponible en el suelo.
- Simular la respuesta de los cultivos ante distintos escenarios de fertilización.

En Ecuador, la integración de RNA con sensores IoT se está aplicando en **proyectos de fertirriego inteligente**, como el desarrollado por UNESUM y ESPOL, donde se logra una eficiencia de uso del nitrógeno (NUE) superior al 75 %.

## **3.3 Fuentes y bases de datos agroclimáticas, edáficas y satelitales**

El desarrollo de modelos predictivos requiere bases de datos extensas, diversas y georreferenciadas. Las principales fuentes son:

| TIPO DE DATOS | FUENTE O PLATAFORMA                  | EJEMPLO DE VARIABLES                                          |
|---------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| CLIMÁTICOS    | INAMHI, ERA5, WorldClim              | Temperatura, precipitación, radiación solar, humedad relativa |
| EDÁFICOS      | ISRIC SoilGrids, MAG Ecuador, INIAP  | pH, textura, carbono orgánico, capacidad de campo             |
| TOPOGRÁFICOS  | SRTM, ALOS PALSAR, MDT nacionales    | Altitud, pendiente, exposición, curvatura                     |
| SATELITALES   | Sentinel-2, Landsat 8/9, PlanetScope | NDVI, NDRE, EVI, cobertura vegetal, estrés hídrico            |
| PRODUCTIVOS   | MAGAP-SIGAGRO, FAOSTAT               | Rendimiento, tipo de cultivo, superficie cosechada            |

Estos conjuntos de datos son integrados en **entornos SIG y plataformas de Big Data**, donde se estandarizan, limpian y combinan para alimentar los modelos de IA. La disponibilidad de información histórica (por ejemplo, series de 30 años de precipitación y rendimiento) permite calibrar modelos robustos y aplicables a diferentes regiones del país.

### 3.4 Modelos de fertilidad y balance de nutrientes basados en aprendizaje automático

El uso de algoritmos de aprendizaje automático (Machine Learning) permite desarrollar **modelos de fertilidad predictiva**, que estiman la disponibilidad de nutrientes y la eficiencia de los fertilizantes en función de las condiciones locales.

#### Componentes del modelo:

- Entrada de datos: características del suelo (pH, textura, CIC, materia orgánica), clima y manejo del cultivo.
- Entrenamiento del modelo: algoritmos (RF, SVM o RNA) aprenden patrones a partir de bases de datos calibradas.
- Predicción: el modelo genera mapas de fertilidad o requerimiento nutricional específicos por parcela.

- Optimización: integración con modelos de simulación (por ejemplo, DSSAT, APSIM) para ajustar dosis de fertilización.
- Ejemplo aplicado: En la provincia de Manabí, un modelo híbrido RF–RNA permitió predecir la concentración de fósforo disponible en suelos maiceros con un error promedio de 0,15 ppm, generando mapas de recomendación de fertilización fosfatada a escala predial.

**Además, estos modelos facilitan la estimación de:**

- Balance de nutrientes (N, P, K) por cultivo y zona agroecológica.
- Eficiencia del uso de nutrientes (NUE, PUE, KUE).
- Riesgos de lixiviación y contaminación difusa.

Los resultados se visualizan en tableros digitales interactivos, accesibles desde computadoras o dispositivos móviles, favoreciendo la toma de decisiones basada en evidencia científica.

### **3.5 Desafíos y perspectivas del Big Data agrícola**

A pesar de sus avances, la implementación del Big Data agrícola enfrenta varios retos en América Latina y Ecuador:

- Falta de estandarización y calidad de datos, especialmente en pequeños productores.
- Escasa conectividad rural, que limita la transmisión de información en tiempo real.
- Déficit de capacidades técnicas en análisis de datos y modelado predictivo.
- Resistencia a la adopción tecnológica por desconocimiento o costos iniciales.

Sin embargo, las tendencias globales apuntan a la creación de laboratorios de inteligencia agrícola, donde universidades, centros de investigación y empresas privadas colaboren en la generación de modelos abiertos y transferibles.

En Ecuador, iniciativas como AgriData–Ecuador, SmartAgro UNESUM y MAG-GeoInteligencia Agrícola están sentando las bases de una nueva era digital para el manejo sostenible del suelo y los cultivos.

## **4. Fertilirriego inteligente y automatizado**

El **fertilirriego inteligente** representa una de las aplicaciones más avanzadas de la agricultura digital, al integrar en tiempo real los tres componentes esenciales del sistema productivo: **suelo, agua y nutrientes**. A través de sensores, redes inalámbricas y plataformas basadas en inteligencia artificial,

se optimiza la administración de agua y fertilizantes, asegurando un uso eficiente de los recursos y una mejora significativa de la productividad agrícola.

En países con alta variabilidad climática y edáfica como Ecuador, esta tecnología se ha convertido en una herramienta estratégica para mitigar los efectos del cambio climático, reducir el desperdicio de agua y disminuir la contaminación por lixiviación de nutrientes, especialmente nitratos y fosfatos.

#### **4.1 Integración del suelo, el agua y los nutrientes en un sistema de control digital**

El principio del fertirriego inteligente se basa en la **retroalimentación continua entre sensores de campo, algoritmos de control y actuadores automáticos**. Estos sistemas miden parámetros críticos (humedad, conductividad eléctrica, pH, temperatura del suelo y concentración de nutrientes) y ajustan dinámicamente la cantidad de agua y fertilizante aplicada según las necesidades reales del cultivo.

La arquitectura típica incluye:

- **Sensores** de humedad del suelo (capacitivos o tensiométricos), temperatura, salinidad y pH.
- **Controladores programables (PLC o microcontroladores IoT)** que interpretan las señales y activan válvulas o bombas.
- **Sistemas de riego presurizado** (goteo, aspersión o pivote central) equipados con inyectores de fertilizantes.
- **Plataformas digitales** que almacenan y procesan los datos en la nube, generando alertas o recomendaciones automáticas.
- El flujo de información sigue una lógica de ciclo cerrado: **Sensor → Transmisión → Análisis → Decisión → Actuador → Retroalimentación.**

De esta forma, el sistema no solo riega, sino que **aprende y adapta su comportamiento**, mejorando la precisión a lo largo del tiempo gracias al uso de modelos de aprendizaje automático.

#### **4.2 Internet de las Cosas (IoT) y controladores automáticos para fertirrigación**

El **Internet de las Cosas (IoT)** ha revolucionado la gestión del fertirriego al conectar sensores, estaciones meteorológicas, válvulas y bombas a través de redes inalámbricas (LoRa, ZigBee, Wi-Fi o NB-IoT). Los datos recolectados se

transmiten a una **plataforma central**, donde son procesados por algoritmos que determinan cuándo, cuánto y dónde aplicar agua o fertilizante.

#### Componentes principales de un sistema IoT de fertirrigación:

| COMPONENTE             | FUNCIÓN                                    | EJEMPLO TECNOLÓGICO                                      |
|------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| SENSORES IOT           | Medir humedad, pH, temperatura y CE        | Decagon 5TE, Sentek Drill&Drop, Vegetronix VH400         |
| NODOS DE COMUNICACIÓN  | Transmitir datos vía LoRa o Wi-Fi          | Dragino, Arduino MKR WAN, ESP32                          |
| GATEWAY O CONCENTRADOR | Enlaza red local con la nube               | Raspberry Pi, NetBeat Hub                                |
| PLATAFORMA DE ANÁLISIS | Procesa datos y toma decisiones            | NetBeat™, CropX™, Arable™, ThingSpeak™, Google Cloud IoT |
| ACTUADORES             | Controlan bombas, válvulas y dosificadores | Solenoides Hunter, ferti-inyectores Netafim              |

Los controladores automáticos pueden programarse para regar **según condiciones en tiempo real**, aplicando algoritmos PID (Proporcional–Integral–Derivativo) o lógicas difusas que corrigen desviaciones respecto a valores óptimos de humedad o conductividad.

#### Ejemplo:

Si la humedad cae por debajo del 60 % de la capacidad de campo y la conductividad eléctrica supera 2.5 dS/m, el sistema ajusta el riego y diluye la solución nutritiva automáticamente, previniendo salinización.

### 4.3 Sensores de humedad y salinidad conectados a redes inalámbricas

Los sensores constituyen el **núcleo funcional** de cualquier sistema de fertirriego inteligente. Su correcta ubicación y calibración determinan la precisión del control.

#### Tipos de sensores empleados:

- **De humedad:**  
*Capacitivos* (miden la constante dieléctrica del suelo).  
*Tensiométricos* (miden la succión del agua por la matriz del suelo).  
*De reflectometría en el dominio del tiempo (TDR)*, de alta precisión.

- **De salinidad o conductividad eléctrica (EC):** evalúan la concentración total de sales, indicando el riesgo de estrés osmótico.
- **De pH y temperatura:** permiten ajustar la solubilidad de los fertilizantes en el agua de riego.

Estos sensores se comunican con plataformas IoT mediante protocolos de bajo consumo energético. En Ecuador, proyectos piloto desarrollados por la **UNESUM y el MAG**, con sensores LoRaWAN en cultivos de banano y maíz, han logrado reducir **hasta un 25 % el consumo de agua y un 30 % la pérdida de nitrógeno por lixiviación**.

**Ejemplo práctico:** En un cultivo de pimiento bajo invernadero, sensores TDR colocados a distintas profundidades (10, 30 y 50 cm) permiten detectar el avance del frente de humedecimiento. El sistema ajusta el tiempo de riego en función del consumo diario de agua del cultivo y del déficit hídrico del suelo.

#### 4.4 Plataformas comerciales y experiencias locales

El mercado ofrece soluciones integrales de fertirriego digital con distintos niveles de automatización:

| PLATAFORMA                    | ORIGEN           | CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES                                                                                          |
|-------------------------------|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>NETBEAT™ (NETAFIM)</b>     | Israel           | Control centralizado de riego y fertirrigación; análisis predictivo con IA; integración satelital.                   |
| <b>CROPX™</b>                 | EE. UU. / Israel | Sensores inalámbricos de humedad y EC; plataforma de análisis en la nube con recomendaciones automatizadas.          |
| <b>ARABLE™</b>                | EE. UU.          | Combina sensores microclimáticos con imágenes espectrales; calcula índices NDVI y evapotranspiración.                |
| <b>AGRISMART IOT (BRASIL)</b> | Brasil           | Adaptado a climas tropicales; control remoto de válvulas y bombas mediante aplicaciones móviles.                     |
| <b>SMARTAGRO UNESUM</b>       | Ecuador          | Sistema experimental con sensores LoRa, controladores ESP32 y plataforma ThingSpeak; enfoque educativo y productivo. |

En **Ecuador**, las experiencias más notables incluyen:

- **Proyecto “Smart Banano” (El Oro, 2024)**: implementó sensores IoT y modelos de predicción de humedad del suelo, reduciendo en un 22 % el gasto de agua.
- **Sistema de fertirriego inteligente en maíz (Manabí, 2023–2025)**: desarrollado por UNESUM, integra sensores capacitivos, controladores Arduino y análisis de datos en Google Cloud, con una mejora del 18 % en rendimiento y ahorro de 20 kg N/ha.

#### 4.5 Beneficios y desafíos del fertirriego digital

**Beneficios principales:**

- **Eficiencia hídrica**: riego ajustado a la demanda real del cultivo.
- **Optimización del uso de fertilizantes**: reducción de pérdidas por lixiviación y volatilización.
- **Aumento del rendimiento**: mejora del equilibrio hídrico y nutricional.
- **Monitoreo continuo**: detección temprana de deficiencias o fallas del sistema.
- **Sostenibilidad ambiental**: menor contaminación del agua subterránea y reducción de emisiones de  $N_2O$ .

**Desafíos actuales:**

- Costos iniciales elevados y dependencia de conectividad estable.
- Falta de capacitación técnica en zonas rurales.
- Adaptación de algoritmos a condiciones locales (altitud, tipo de suelo, clima).
- Necesidad de marcos normativos que regulen el uso de sensores e IA agrícola.

#### 4.6 Perspectivas futuras

La tendencia global apunta hacia sistemas de **fertirriego autónomos**, capaces de autoajustarse según predicciones climáticas y respuestas fisiológicas del cultivo.

**Las innovaciones emergentes incluyen:**

- **Gemelos digitales de suelo y cultivo**, que simulan escenarios de manejo en tiempo real.

- **Integración con imágenes satelitales y drones multispectrales**, para calibrar la distribución espacial del riego.
- **Modelos de IA autoaprendientes**, que mejoran con cada ciclo agrícola.
- **Blockchain agrícola**, para trazabilidad de insumos y sostenibilidad hídrica certificada.

La implementación de estas tecnologías en los sistemas productivos ecuatorianos puede transformar la gestión del agua y los nutrientes, consolidando una **agricultura inteligente, eficiente y resiliente**, alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 2, 12 y 13).

## 5. Indicadores digitales de sostenibilidad

El concepto de sostenibilidad agrícola ha evolucionado desde una visión centrada únicamente en la productividad hacia un enfoque integral que incluye el **impacto ambiental, energético y climático** de las actividades agrarias. En este contexto, los **indicadores digitales de sostenibilidad** permiten medir y gestionar en tiempo real variables como la huella de carbono, el consumo de agua, la eficiencia en el uso de nutrientes y el balance energético, mediante herramientas basadas en sensores, plataformas SIG e inteligencia artificial (IA).

Los sistemas de monitoreo digital proporcionan datos precisos y actualizados que permiten **evaluar la eficiencia ecológica de los sistemas productivos**, predecir riesgos y diseñar estrategias de mitigación de impactos. En Ecuador, donde la agricultura representa una parte significativa de las emisiones nacionales de gases de efecto invernadero (GEI) —principalmente por el uso de fertilizantes nitrogenados, deforestación y manejo ineficiente del agua—, la implementación de estos indicadores es clave para avanzar hacia una agricultura climáticamente inteligente.

### 5.1 Huella de carbono y huella hídrica del sistema agrícola

La **huella de carbono agrícola (HCA)** cuantifica las emisiones directas e indirectas de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) generadas por las actividades del sistema productivo. Su cálculo digital integra información proveniente de sensores, drones y registros en la nube, permitiendo analizar cada etapa del ciclo de cultivo: preparación del suelo, fertilización, riego, cosecha y transporte.

**Fórmula general:**

$$HCA = \sum(E_i \times FE_i)$$

donde  $E_i$  representa la cantidad de insumo o actividad y  $FE_i$  el factor de emisión asociado (kg CO<sub>2</sub>-eq por unidad).

Las herramientas digitales —como **Cool Farm Tool**, **COMET-Farm** o **Farm Carbon Calculator**— permiten estimar las emisiones con base en bases de datos internacionales y variables locales (tipo de suelo, dosis de fertilizante, manejo del estiércol). En Ecuador, estas metodologías pueden adaptarse a sistemas como el banano, el cacao o el maíz, integrando datos satelitales y de sensores IoT para obtener una medición precisa por hectárea.

#### **Huella hídrica agrícola (HHA):**

Evalúa el volumen total de agua utilizada (azul, verde y gris) en la producción de un cultivo. Los modelos digitales de balance hídrico, combinados con sensores de humedad y teledetección, permiten determinar el consumo real de agua y detectar ineficiencias en el riego.

Ejemplo aplicado:

En el Valle del Chota (Imbabura), un sistema piloto de monitoreo de fertirriego inteligente permitió calcular una **HHA de 960 m<sup>3</sup>/ton de maíz**, con una reducción del 18 % respecto al manejo convencional, gracias a la programación basada en sensores y predicciones climáticas.

### **5.2 Eficiencia de uso del nitrógeno (NUE) y del fósforo (PUE)**

La **eficiencia de uso de nutrientes (NUE y PUE)** se refiere a la proporción de nutriente absorbido por el cultivo respecto a la cantidad aplicada. En sistemas intensivos, estos indicadores reflejan tanto la productividad como la sostenibilidad, ya que una baja eficiencia implica pérdidas económicas y contaminación ambiental.

#### **Cálculo digital:**

$$\text{NUE} = \frac{\text{N absorbido por el cultivo}}{\text{N aplicado}} \times 100$$
$$\text{PUE} = \frac{\text{P absorbido}}{\text{P aplicado}} \times 100$$

El monitoreo continuo mediante sensores de nitrato en suelo (Ion Selective Electrodes – ISE), imágenes satelitales (NDRE, NRI) y análisis de clorofila (SPAD, GreenSeeker) permite estimar la **absorción y redistribución de nutrientes** en tiempo real. La inteligencia artificial, mediante redes neuronales y modelos de regresión, puede correlacionar estos datos con variables climáticas y fisiológicas para ajustar las dosis de fertilización.

### **Ejemplo:**

En cultivos de arroz en Manabí, la aplicación de modelos predictivos basados en aprendizaje automático permitió elevar la NUE del 42 % al 68 %, reduciendo en un 35 % la aplicación de urea sin afectar el rendimiento.

## **5.3 Monitoreo del balance energético y emisiones mediante IA**

El **balance energético** mide la relación entre la energía producida (biomasa, granos) y la energía invertida (combustibles, insumos, fertilizantes). Los sistemas digitales de monitoreo recopilan automáticamente datos de consumo energético, rendimiento, emisiones y transporte, generando reportes automáticos de sostenibilidad.

Mediante algoritmos de IA, se pueden **modelar las emisiones netas** y optimizar la eficiencia global del sistema. Plataformas como **Google Earth Engine**, **OpenLCA** o **Agrimetrics** integran imágenes satelitales, datos meteorológicos y registros de campo para calcular balances en grandes extensiones de terreno.

### **Aplicaciones prácticas:**

- Modelos de *machine learning* estiman la emisión de N<sub>2</sub>O en función del tipo de fertilizante, humedad y temperatura del suelo.
- Drones equipados con cámaras térmicas detectan fugas de agua o zonas de estrés hídrico que incrementan el gasto energético.
- Sensores IoT registran el consumo eléctrico de bombas y sistemas de riego para identificar puntos de optimización.

Estos datos pueden alimentar tableros digitales (dashboards) que presentan en tiempo real indicadores clave de sostenibilidad y alertas automáticas sobre desviaciones.

## **5.4 Toma de decisiones para la mitigación de impactos ambientales**

La digitalización de los indicadores de sostenibilidad permite avanzar hacia una **gestión proactiva y predictiva** de los sistemas agrícolas. Los modelos de apoyo a la decisión (DSS – *Decision Support Systems*) combinan información ambiental, edáfica y productiva para recomendar prácticas que reduzcan el impacto ambiental sin comprometer la productividad.

### **Principales aplicaciones:**

- **Recomendación automática de fertilización:** el sistema ajusta las dosis según el contenido de nitratos medido y las predicciones climáticas.
- **Alertas de riesgo ambiental:** detección de saturación hídrica, erosión potencial o emisiones excesivas.
- **Optimización espacial:** integración con SIG para identificar zonas de manejo diferenciado y establecer áreas de conservación.
- **Certificación verde:** trazabilidad digital de las emisiones y uso de recursos, compatible con estándares internacionales (ISO 14046, GlobalG.A.P., FAO SAFA).

**Ejemplo ecuatoriano:** El proyecto **AgroSostenible UNESUM 2025**, que combina sensores LoRaWAN, datos meteorológicos y modelos de IA, ha permitido establecer estrategias de mitigación de emisiones de N<sub>2</sub>O en cultivos de maíz y arroz, reduciendo en promedio **0,45 t CO<sub>2</sub>-eq/ha/año**.

## 5.5 Perspectivas futuras

Los avances tecnológicos apuntan hacia una **sostenibilidad digital integral**, donde los indicadores ambientales se integran a sistemas autónomos de decisión basados en IA. En el corto plazo, se prevé:

- Uso de **gemelos digitales** del suelo y los cultivos para simular escenarios de manejo sostenible.
- Aplicación de **blockchain agrícola** para garantizar trazabilidad y transparencia ambiental.
- Incorporación de **modelos climáticos regionales** en las plataformas de gestión de fertilidad y riego.
- Creación de **observatorios de sostenibilidad agroambiental**, conectados a redes académicas y productivas.

Con estos desarrollos, la agricultura ecuatoriana puede consolidarse como un referente en **eficiencia ecológica y productividad inteligente**, contribuyendo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 2, 12 y 13) y fortaleciendo la resiliencia de los sistemas agrícolas frente al cambio climático.

## 6. Experiencias latinoamericanas

La agricultura digital en América Latina ha evolucionado de manera acelerada en la última década, impulsada por la necesidad de optimizar recursos, aumentar la competitividad y responder a las presiones ambientales y climáticas. Sin embargo, su grado de adopción varía según el contexto económico, el tipo de cultivo y la infraestructura tecnológica disponible. Los

casos de **Ecuador, Brasil y México** constituyen ejemplos representativos de esta transición hacia sistemas agrícolas inteligentes y sostenibles.

### **6.1 Ecuador: monitoreo de fertilidad en banano y cacao con drones**

En Ecuador, país eminentemente agrícola y biodiverso, la aplicación de tecnologías digitales se ha concentrado en los cultivos de **banano, cacao y café**, productos de alta relevancia económica y de exportación. Los **drones multiespectrales y RGB**, equipados con sensores de alta resolución, permiten evaluar la **fertilidad y el estado fisiológico del cultivo** mediante índices espectrales como el **NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)** y el **NDRE (Normalized Difference Red Edge)**.

Los datos obtenidos se integran a **modelos digitales del terreno (MDT)** y a sistemas de información geográfica (SIG), facilitando el diagnóstico espacial de nutrientes, humedad y estrés vegetal. Ejemplo emblemático es el proyecto implementado en **Los Ríos y El Oro**, donde drones DJI Phantom 4 Multispectral y plataformas **Pix4Dfields** y **QGIS** se emplearon para generar mapas de variabilidad de clorofila y vigor.

Los resultados demostraron que la aplicación diferenciada de fertilizantes nitrogenados redujo un **25 % el uso de insumos**, con incrementos del **18 % en rendimiento del banano** y **22 % en cacao**, además de un ahorro energético y menor lixiviación de nitratos.

La experiencia ecuatoriana muestra la viabilidad de la agricultura digital en zonas tropicales, destacando la importancia de la **capacitación técnica de productores**, el fortalecimiento institucional y la disponibilidad de conectividad rural para maximizar los beneficios de la digitalización agraria.

### **6.2 Brasil: inteligencia artificial aplicada a la soya y la caña de azúcar**

Brasil lidera la agricultura de precisión en América Latina. Su modelo combina **sensores remotos, big data agrícola e inteligencia artificial (IA)** para la gestión de cultivos a gran escala. En el sector de la **soya y la caña de azúcar**, las empresas agrícolas han incorporado plataformas digitales que integran datos meteorológicos, satelitales y de campo para la **toma de decisiones automatizada**.

Los sistemas de IA, basados en **machine learning** (Random Forest, SVM y redes neuronales convolucionales), permiten predecir el rendimiento de los cultivos, el contenido de clorofila y la respuesta a la fertilización. Plataformas como **AgroTools, Solinftec y Agrosmart** recopilan millones de

registros de sensores IoT (humedad, pH, temperatura, EC) y los procesan en tiempo real para ajustar la **fertilización variable (VRA)** y la programación de **riego inteligente**.

Un estudio de Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) demostró que, en plantaciones de caña de azúcar de São Paulo, la integración de IA redujo un **15 % el consumo de agua**, **20 % los fertilizantes** y aumentó **hasta un 10 % la productividad**, consolidando un modelo de gestión agrícola basado en datos (*data-driven agriculture*).

El caso brasileño evidencia cómo la **infraestructura tecnológica, la investigación pública y la inversión privada** pueden converger para transformar la agricultura tradicional en un sistema digital, sostenible y competitivo.

### **6.3 México: agricultura de precisión en maíz con SIG y modelos predictivos**

En México, la agricultura digital ha sido aplicada especialmente en cultivos básicos como el **maíz y el trigo**, fundamentales para la seguridad alimentaria. El **Programa de Agricultura de Precisión de la Universidad Autónoma Chapingo** y el **Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT)** han desarrollado sistemas basados en **SIG, teledetección e IA** para el diagnóstico de suelos y la predicción del rendimiento.

Los modelos predictivos, alimentados con datos de **clima, textura del suelo, manejo del riego y fertilización**, utilizan algoritmos como **regresión múltiple, Random Forest y Gradient Boosting**. Estos modelos permiten estimar la respuesta del cultivo a diferentes escenarios de manejo y recomendar la **dosis óptima de nitrógeno** en función del potencial productivo local.

Los resultados de campo muestran aumentos de **hasta el 25 % en eficiencia del uso de nitrógeno (NUE)** y reducciones de **30 % en costos de fertilización**, acompañados de un monitoreo satelital de humedad mediante imágenes **Sentinel-2 y Landsat-8**.

La experiencia mexicana resalta la importancia de la **educación técnica y la formación digital de los agricultores**, así como de políticas públicas que fomenten la interoperabilidad de los datos y la infraestructura de conectividad rural.

### **6.4 Lecciones aprendidas y retos socioeconómicos**

Del análisis de estas experiencias se derivan valiosas lecciones para la región:

**Lecciones clave:**

- La integración de datos multifuente (sensores, satélites, clima, suelo) mejora la **eficiencia en la toma de decisiones agrícolas**.
- La **participación del sector público** y la vinculación con universidades y centros de investigación fortalecen la adopción tecnológica.
- Los sistemas de **capacitación digital continua** son esenciales para garantizar la sostenibilidad de las innovaciones.
- Los beneficios ambientales son medibles: reducción de insumos, ahorro de agua y mitigación de emisiones.

#### **Retos actuales:**

7. Limitada conectividad en áreas rurales y altos costos de equipos tecnológicos.
8. Brechas digitales y carencia de programas de formación práctica.
9. Falta de marcos normativos sobre datos agrícolas, privacidad y propiedad intelectual.
10. Necesidad de modelos de **financiamiento verde y digital** para pequeños productores.

En síntesis, América Latina avanza hacia una agricultura inteligente, pero su consolidación requiere políticas públicas coherentes, infraestructura digital robusta y estrategias inclusivas que integren a pequeños y medianos productores en la revolución agrícola 4.0.

## **7. Conclusiones y desafíos futuros**

El manejo digital del suelo representa un **salto cualitativo en la gestión de la agricultura moderna**, donde la información se convierte en el insumo más valioso. Los avances en sensores, SIG, drones y modelos de inteligencia artificial están redefiniendo la forma en que se diagnostican, monitorean y administran los recursos edáficos.

#### **Principales conclusiones:**

- La digitalización agrícola permite una **fertilización precisa, localizada y sostenible**, basada en evidencia científica.
- El uso de **modelos predictivos y big data** mejora la productividad y reduce la huella ambiental.
- Los **indicadores digitales de sostenibilidad** ofrecen métricas objetivas para evaluar la eficiencia ecológica y económica de los sistemas productivos.
- Las experiencias latinoamericanas demuestran que la combinación de ciencia, tecnología y participación local genera impactos positivos tangibles.

### **Desafíos estratégicos hacia la Agricultura 5.0:**

- Incorporar **inteligencia artificial cognitiva**, capaz de aprender y anticipar decisiones de manejo agronómico.
- Desarrollar **robots agrícolas autónomos** y maquinaria inteligente conectada por IoT.
- Integrar **blockchain y trazabilidad digital** para garantizar transparencia y certificación de sostenibilidad.
- Fomentar la **formación digital de agricultores y técnicos**, reduciendo las brechas tecnológicas.
- Consolidar redes de investigación y observatorios regionales de **suelos inteligentes y agricultura digital**.

En perspectiva, la **Agricultura 5.0** no solo representa una evolución tecnológica, sino una transformación cultural que redefine la relación entre el ser humano, el suelo y la tecnología. Su implementación en Ecuador y América Latina será decisiva para alcanzar un modelo agrícola resiliente, eficiente y alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el **ODS 2 (Hambre Cero)**, **ODS 12 (Producción y Consumo Responsables)** y **ODS 13 (Acción por el Clima)**.

## **CAPÍTULO IX: PLANIFICACIÓN TERRITORIAL Y POLÍTICAS DE SUELOS PARA LA AGRICULTURA SOSTENIBLE**

### **1. Importancia del suelo como recurso estratégico**

El suelo constituye la base material y ecológica sobre la cual se sostiene toda la actividad agrícola, forestal y ganadera. Es un recurso natural no renovable a escala humana, cuya formación requiere siglos de interacción entre procesos geológicos, climáticos, biológicos y antrópicos. Su degradación, en cambio, puede producirse en cuestión de años debido a malas prácticas de manejo, deforestación o uso intensivo sin reposición de nutrientes.

Más allá de su función como soporte físico de los cultivos, el suelo cumple múltiples funciones ecosistémicas que lo convierten en un componente estratégico de los sistemas productivos y de la planificación territorial:

**Función ecológica:** regula el ciclo hidrológico, almacena y depura el agua, actúa como sumidero de carbono y alberga una enorme biodiversidad microbiana y edáfica.

**Función productiva:** suministra los nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal y determina el potencial agrícola del territorio.

**Función ambiental:** filtra contaminantes, amortigua las variaciones climáticas y mitiga los efectos de la erosión y la desertificación.

**Función socioeconómica:** sustenta la seguridad alimentaria, genera empleo rural y constituye la base física del desarrollo territorial.

En términos económicos, el suelo puede valorarse como un capital natural cuya productividad depende de su integridad biofísica y de su manejo sostenible. La pérdida de un centímetro de suelo fértil implica la pérdida de entre 10 y 30 toneladas de materia productiva por hectárea, lo que representa un deterioro del capital ecológico del país.

En el contexto ecuatoriano, donde la topografía diversa genera una amplia gama de suelos —desde los andisoles volcánicos de la Sierra hasta los ultisoles y oxisoles de la Amazonía—, su planificación y protección son esenciales para garantizar la sostenibilidad agrícola. Sin embargo, los procesos de expansión urbana, minería, deforestación y sobreexplotación agroindustrial amenazan cada vez más su estabilidad estructural y su función ecológica.

El reconocimiento del suelo como recurso estratégico implica asumir una visión integral que combine la ordenación territorial, las políticas públicas y

la gestión ambiental, orientadas a conservar la fertilidad y promover la productividad sostenible. Este enfoque se alinea con los principios de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, especialmente los Objetivos de Desarrollo Sostenible:

ODS 2 (Hambre Cero): promover una agricultura sostenible basada en suelos fértiles y resilientes.

ODS 12 (Producción y Consumo Responsables): reducir la degradación del suelo mediante prácticas agroecológicas.

ODS 15 (Vida de Ecosistemas Terrestres): combatir la desertificación y restaurar tierras degradadas.

En consecuencia, el suelo debe entenderse no solo como un medio físico de producción, sino como un activo estratégico del territorio nacional, indispensable para la planificación rural, la mitigación del cambio climático y la sostenibilidad alimentaria.

## **2. Marco normativo internacional y nacional**

La gestión sostenible del suelo está respaldada por un conjunto de **instrumentos internacionales y nacionales** que establecen directrices, compromisos y mecanismos de implementación orientados a conservar la fertilidad, prevenir la degradación y asegurar la resiliencia de los sistemas agrícolas frente al cambio climático. Estas normas constituyen el fundamento jurídico y técnico para la planificación territorial y la formulación de políticas agrarias sostenibles.

### **2.1 Marco internacional**

A nivel global, diversos organismos multilaterales, especialmente la **Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)**, han liderado la elaboración de políticas y programas dirigidos a la gestión integral del suelo como recurso vital. Entre los más relevantes destacan:

**Estrategia Mundial de Suelos (Global Soil Partnership, FAO, 2012):** Este instrumento busca “mejorar la gobernanza y el manejo sostenible de los suelos” mediante cinco pilares de acción:

- Promoción de prácticas sostenibles de manejo del suelo.
- Inversión en investigación, educación y formación técnica.
- Generación de sistemas de información y monitoreo global del suelo.
- Fortalecimiento de políticas públicas y marcos legales.

- Difusión de la conciencia social sobre la importancia del suelo como patrimonio común.

Su aplicación se materializa a través de la **Alianza Mundial por el Suelo (GSP)**, que agrupa a países miembros y redes científicas regionales, incluyendo la **Alianza Regional de Suelos para América Latina y el Caribe (ARSALC)**, de la cual Ecuador forma parte activa.

**Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (ONU, 2015):** Varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) están directamente vinculados con la gestión de suelos:

- **ODS 2 (Hambre Cero):** Promueve una agricultura sostenible mediante la restauración de suelos degradados y la mejora de su fertilidad.
- **ODS 13 (Acción por el Clima):** Exhorta a adoptar medidas de mitigación y adaptación basadas en ecosistemas, donde los suelos actúan como sumideros de carbono.
- **ODS 15 (Vida de Ecosistemas Terrestres):** Propone detener la degradación de tierras y lograr la neutralidad en su pérdida.

**Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (UNCCD, 1994):**

Establece compromisos globales para prevenir la erosión, degradación y pérdida de tierras productivas, especialmente en regiones áridas y semiáridas. Ecuador, como país signatario, implementa acciones dentro de su **Programa de Acción Nacional de Lucha contra la Desertificación y la Sequía (PAN-LCDS)**.

**Acuerdo de París (2015):** Reconoce el papel de los suelos agrícolas como sumideros de carbono dentro de las **Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC)**, alentando la adopción de prácticas de manejo sostenible como la agroforestería, la labranza mínima y la fertilización orgánica.

En conjunto, estos marcos internacionales proporcionan **principios orientadores** para que los Estados formulen políticas nacionales que articulen la productividad agrícola con la conservación ambiental, promoviendo un enfoque territorial del manejo del suelo.

## 2.2 Marco normativo nacional ecuatoriano

En el Ecuador, la gestión del suelo está reconocida dentro del marco constitucional y regulatorio ambiental como **un componente esencial del patrimonio natural del Estado y de la soberanía alimentaria**. Las principales normativas y planes vigentes son las siguientes:

**Constitución de la República del Ecuador (2008):** Reconoce al suelo como un bien nacional de uso público, sujeto a políticas de conservación y manejo sostenible (Art. 406 y 409). Establece la obligación del Estado de prevenir su degradación y fomentar prácticas de restauración ecológica, priorizando la soberanía alimentaria y el derecho de las comunidades a un ambiente sano.

**Código Orgánico del Ambiente (COA, 2017):** Es la principal norma ambiental del país. Define el **uso sostenible del suelo** como uno de los ejes de la gestión ambiental, estableciendo:

- La obligación de elaborar **planes de manejo y conservación de suelos** en proyectos agrícolas y ganaderos.
- La responsabilidad administrativa por contaminación, erosión o pérdida de cobertura vegetal.
- La creación del **Sistema Nacional de Información Ambiental (SINAA)**, que incluye registros de suelos y uso del territorio.

**Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales (2016):** Regula la tenencia, redistribución y uso productivo del suelo rural, promoviendo la equidad en el acceso y la sostenibilidad agroecológica. Introduce el concepto de “función social y ambiental de la tierra”.

**Plan Nacional de Desarrollo Agropecuario Sostenible (MAG, 2020–2030):** Formula estrategias para incrementar la productividad sin comprometer la base edáfica, a través de programas de **manejo integrado del suelo y agua, agricultura de conservación, y fomento a bioinsumos y abonos orgánicos**.

**Estrategia Nacional de Suelos del Ecuador (MAATE–MAG, 2023):** En elaboración, busca establecer lineamientos técnicos para la **clasificación agroproductiva, monitoreo de la degradación y recuperación de suelos vulnerables**, articulando esfuerzos interinstitucionales con los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GADs).

**Planes de Ordenamiento Territorial (PDOT) y Zonificación Agroecológica y Socioeconómica (ZAE):** Instrumentos técnicos de planificación local que definen las aptitudes del suelo, su capacidad de uso mayor y los niveles de intervención permitidos, garantizando una gestión territorial sustentable.

### 2.3 Convergencia entre marcos internacionales y nacionales

Ecuador ha avanzado en la **armonización de sus políticas públicas** con los compromisos internacionales en materia de suelo. Las estrategias nacionales de cambio climático, biodiversidad y agricultura sostenible incorporan la gestión edáfica como un eje transversal, alineando los objetivos del **ODS 2, 13 y 15** con los **principios del COA y los PDOT**.

Sin embargo, persisten desafíos significativos:

- Fragmentación institucional entre entidades rectoras (MAG, MAATE, SENAGUA, GADs).
- Débil implementación de mecanismos de monitoreo y restauración.
- Escasa participación comunitaria en la gestión del suelo y falta de incentivos económicos para la conservación.

Fortalecer la **gobernanza del suelo** exige un marco de cooperación multiescalar, donde la ciencia del suelo, las tecnologías digitales y las políticas territoriales confluyan en estrategias de **agricultura sostenible, resiliente y climáticamente inteligente**.

## 3. Ordenamiento territorial y uso del suelo

El **ordenamiento territorial** constituye una herramienta esencial para orientar el uso racional y sostenible del suelo, garantizando el equilibrio entre la productividad agrícola, la conservación de los ecosistemas y el bienestar de las comunidades. Su propósito es armonizar las actividades humanas con la aptitud natural del territorio, evitando el deterioro ambiental y los conflictos derivados de un uso inadecuado o intensivo de los recursos edáficos.

En el contexto ecuatoriano, caracterizado por una enorme diversidad fisiográfica y ecológica, la planificación territorial adquiere un rol estratégico. Desde los suelos volcánicos de la Sierra hasta las planicies aluviales de la Costa y los suelos lateríticos de la Amazonía, la **heterogeneidad edáfica y climática** obliga a diseñar políticas de ocupación y manejo diferenciadas, sustentadas en criterios técnicos y científicos.

### 3.1 Zonificación agroecológica y capacidad de uso del suelo

La **zonificación agroecológica (ZAE)** es una metodología de planificación territorial que integra variables **edáficas, climáticas, topográficas y socioeconómicas** para definir las áreas más aptas para determinados tipos de uso o cultivos. Su aplicación permite orientar la producción hacia zonas

de mayor potencial y restringir las actividades agrícolas o ganaderas en suelos frágiles o con limitaciones ambientales severas.

### ***a) Principios y objetivos de la ZAE***

El objetivo principal de la ZAE es garantizar la sostenibilidad agroproductiva mediante:

- **La compatibilidad entre las características biofísicas del suelo y el uso propuesto.**
- **La reducción de la degradación y erosión**, evitando el sobrepastoreo o la deforestación en áreas vulnerables.
- **La optimización del rendimiento agrícola** mediante la ubicación estratégica de cultivos en función del clima, relieve y fertilidad.
- **El apoyo a la planificación rural y la inversión pública**, facilitando la toma de decisiones sobre riego, infraestructura, conservación o reconversión productiva.

### ***b) Parámetros técnicos utilizados***

La zonificación agroecológica se basa en el análisis conjunto de:

- **Factores edáficos:** textura, estructura, profundidad efectiva, drenaje, contenido de materia orgánica, pH y salinidad.
- **Factores climáticos:** temperatura media anual, precipitación, radiación solar y humedad relativa.
- **Factores fisiográficos:** pendiente, altitud y orientación del terreno.
- **Factores socioeconómicos:** tenencia de la tierra, acceso a mercados, infraestructura y tecnología disponible.

El cruce de estas variables mediante **Sistemas de Información Geográfica (SIG)** y modelos multicriterio (AHP, FAO Land Evaluation Framework) permite generar **mapas de aptitud agrícola** que clasifican el territorio en zonas de alta, media o baja potencialidad para determinados cultivos o sistemas de manejo.

### ***c) Capacidad de uso mayor del suelo (CUM)***

La **capacidad de uso mayor** es un concepto complementario a la ZAE que clasifica los suelos en función de sus **limitaciones naturales y su aptitud para distintos usos** (agrícola, pecuario, forestal o de conservación). En el Ecuador, esta clasificación se realiza de acuerdo con el **Manual de Capacidad de Uso Mayor del MAG (2016)**, que agrupa los suelos en **ocho clases**:

| CLASE      | APTITUD GENERAL                                           | PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS                                                      |
|------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| I Y II     | Alta capacidad agrícola                                   | Suelos profundos, fértiles, planos, con drenaje adecuado.                        |
| III Y IV   | Moderada capacidad agrícola                               | Suelos con pendientes suaves o limitaciones menores; requieren manejo cuidadoso. |
| V Y VI     | Limitada para agricultura, apta para pastos o forestación | Pendientes medias, riesgo de erosión, drenaje deficiente.                        |
| VII Y VIII | No aptos para agricultura                                 | Áreas de conservación, páramos, humedales, zonas de fuerte pendiente o rocosas.  |

La aplicación de la CUM permite establecer **usos compatibles** y evitar conflictos entre la producción intensiva y la conservación ambiental.

### 3.2 Planificación rural y conflictos de uso

El **ordenamiento rural** busca equilibrar la producción agropecuaria con la preservación del patrimonio natural, mediante políticas que regulen la ocupación del suelo y promuevan la equidad territorial. Sin embargo, los **conflictos de uso del suelo** son frecuentes en el país debido a la expansión desordenada de la frontera agrícola, la deforestación, la ganadería extensiva y la urbanización sin control.

#### *a) Causas de los conflictos de uso*

- Cultivo en zonas no aptas: utilización de suelos de pendiente elevada o baja profundidad para agricultura intensiva.
- Conversión de bosques a pastizales: genera pérdida de materia orgánica, erosión y compactación.
- Urbanización de áreas agrícolas fértiles: fenómeno común en la Costa y la Sierra central.
- Sobreuso químico y mecanización excesiva: deterioro físico y biológico del suelo.
- Tenencia fragmentada y presión demográfica: uso ineficiente de los recursos productivos.

### ***b) Consecuencias***

- Estos conflictos generan una serie de impactos ambientales y socioeconómicos:
- Erosión hídrica y eólica acelerada.
- Pérdida de biodiversidad y de la cobertura vegetal.
- Disminución de la capacidad de retención de agua y nutrientes.
- Migración rural y desigualdad en el acceso a la tierra.

### ***c) Estrategias de planificación y manejo***

Para resolver estos conflictos, los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GADs) y el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) implementan instrumentos de planificación tales como:

- Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT): establecen el uso preferente y las restricciones del suelo a nivel cantonal y parroquial.
- Planes de manejo de cuencas hidrográficas: priorizan la conservación del recurso hídrico y la reforestación de zonas altas.
- Sistemas de incentivos para la conservación: pagos por servicios ambientales, certificación orgánica y programas de restauración de suelos degradados.
- Agricultura de conservación y prácticas sostenibles: labranza mínima, rotación de cultivos, terrazas de contorno, uso de abonos orgánicos y cobertura vegetal.

## **3.3 Enfoque ecuatoriano de planificación integrada**

Ecuador avanza hacia un modelo de **planificación territorial integrada**, donde el manejo del suelo se articula con políticas de **agua, biodiversidad, cambio climático y desarrollo rural**. La articulación entre el **MAG, MAATE y los GADs** busca consolidar una gobernanza edáfica que combine información científica, participación social y tecnología geoespacial.

La **Zonificación Agroecológica y Socioeconómica (ZAE-SE, FAO-MAG)**, aplicada en provincias como Manabí, Loja y Napo, constituye un ejemplo de planificación científica, al permitir definir zonas agrícolas sostenibles, áreas de conservación, corredores biológicos y territorios aptos para reconversión productiva.

Su aplicación efectiva podría **reducir los conflictos de uso del suelo hasta en un 40 %**, según proyecciones del MAG (2024), mejorando la eficiencia productiva y la resiliencia climática del país.

### 3.4 Incentivos y mecanismos económicos

El manejo sostenible del suelo no puede depender únicamente de la regulación o de la conciencia ambiental, sino que requiere instrumentos económicos capaces de **estimular las prácticas de conservación, restauración y manejo racional del recurso edáfico**. Los **incentivos económicos y financieros** actúan como herramientas estratégicas para modificar el comportamiento de productores, empresas y gobiernos locales, alineando los objetivos de rentabilidad con los de sostenibilidad ambiental.

En el contexto latinoamericano, y particularmente en Ecuador, donde la pequeña y mediana agricultura ocupa más del 70 % de la superficie cultivada, los mecanismos de compensación e incentivo representan un pilar fundamental para la transición hacia sistemas agrícolas resilientes y de bajo impacto ecológico.

#### ***Pagos por Servicios Ambientales (PSA)***

El Pago por Servicios Ambientales (PSA) es un instrumento de política ambiental mediante el cual los usuarios o beneficiarios de un servicio ecosistémico —como el agua, el carbono, la biodiversidad o la estabilidad del suelo— remuneran económicamente a quienes realizan acciones que aseguran su provisión y conservación. En el caso del suelo, los PSA buscan incentivar prácticas agrícolas que:

- Mantengan la cobertura vegetal y reduzcan la erosión.
- Aumenten la materia orgánica y el secuestro de carbono.
- Promuevan la reforestación, agroforestería y agricultura de conservación.

#### **Ejemplo ecuatoriano**

El Programa Socio Bosque (MAATE), implementado desde 2008, constituye un referente nacional. Aunque inicialmente orientado a la conservación de bosques nativos, su marco conceptual se ha extendido hacia la protección de suelos agrícolas y ecosistemas asociados a cuencas hidrográficas, mediante acuerdos de conservación entre el Estado y las comunidades rurales. Los beneficiarios reciben compensaciones económicas anuales a cambio de mantener el uso sostenible del territorio y evitar actividades degradantes. Este modelo ha demostrado ser eficaz en la reducción de la deforestación y en la recuperación de suelos erosionados, generando beneficios colaterales sobre la calidad del agua y la biodiversidad.

### ***Perspectiva regional***

Países como Costa Rica y México aplican esquemas de PSA específicos para la conservación de suelos agrícolas y servicios hidrológicos, con pagos que oscilan entre US\$ 40 y US\$ 150 por hectárea/año. Estas experiencias constituyen modelos replicables en Ecuador para fortalecer la política de incentivos ambientales vinculados al uso sostenible del suelo.

### ***Créditos verdes y financiamiento climático***

El acceso al financiamiento verde es un componente clave para la adopción de tecnologías sostenibles en el sector agropecuario. Los créditos verdes son líneas de financiamiento preferencial destinadas a proyectos que incorporan buenas prácticas ambientales, restauración de suelos, agricultura regenerativa o sistemas agroforestales.

### ***Características principales***

- Tasas de interés reducidas y plazos extendidos.
- Condiciones de elegibilidad basadas en criterios de sostenibilidad verificados por entidades acreditadas.
- Evaluaciones ambientales previas al desembolso, considerando indicadores de conservación del suelo, reducción de agroquímicos y eficiencia hídrica.

En Ecuador, el Banco de Desarrollo del Ecuador (BDE) y el Banco de Fomento Productivo (BanEcuador) han incorporado líneas de financiamiento verde orientadas al riego tecnificado, manejo sostenible de suelos y transición agroecológica. Asimismo, organismos internacionales como el Fondo Verde para el Clima (GCF) y el Global Environment Facility (GEF) financian proyectos de restauración de paisajes degradados y fortalecimiento de capacidades locales para la gestión del recurso suelo.

Estos instrumentos no solo promueven la sostenibilidad ambiental, sino que reducen la vulnerabilidad económica del productor, al generar sistemas de producción más eficientes, diversificados y resilientes frente a eventos climáticos extremos.

## **Certificaciones ambientales y de carbono**

Las **certificaciones de sostenibilidad y carbono** se han convertido en mecanismos de mercado que premian las buenas prácticas agrícolas con acceso preferencial a nichos de exportación y precios diferenciados. En el caso del suelo, su importancia radica en la capacidad de **demostrar la reducción de emisiones o el aumento del secuestro de carbono orgánico**, mediante prácticas de manejo sostenible.

### ***Principales tipos***

- **Certificaciones de carbono:** acreditan reducciones verificadas de emisiones (CO<sub>2</sub>eq) o aumentos en el almacenamiento de carbono edáfico. Programas como **Verra (VCS)** o **Gold Standard** permiten a los agricultores comercializar “créditos de carbono” en mercados voluntarios.
- **Certificaciones agroambientales:** incluyen sellos como **Rainforest Alliance**, **Fair Trade** o **Orgánico USDA/EU**, que incorporan criterios de conservación de suelo, biodiversidad y reducción de insumos químicos.
- **Certificaciones nacionales:** el **Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE)** promueve el **Sello Punto Verde**, otorgado a empresas que demuestran mejoras verificables en eficiencia de recursos, gestión de residuos y reducción de impacto ambiental.

### ***Beneficios adicionales***

- Incremento del valor agregado y trazabilidad del producto.
- Acceso a mercados sostenibles y preferenciales.
- Reconocimiento público y reputacional de las empresas o productores.
- Promoción del monitoreo técnico del carbono del suelo mediante plataformas digitales y sensores remotos.

### ***Síntesis***

La implementación coordinada de **PSA, créditos verdes y certificaciones de carbono** constituye un **sistema de incentivos integral** que puede transformar la gestión del suelo en Ecuador. Combinados con políticas de educación ambiental y planificación territorial, estos mecanismos estimulan un cambio estructural en los modelos de producción, **pasando de la explotación extractiva a la gestión regenerativa del recurso edáfico**.

De esta manera, se avanza hacia una agricultura verdaderamente sostenible, donde el suelo no se concibe como un insumo agotable, sino como un **capital natural renovable** que genera bienes públicos, estabilidad ecológica y bienestar social.

### **3.5 Educación, innovación y extensión agrícola**

La sostenibilidad del uso del suelo no depende únicamente de políticas públicas o de incentivos económicos, sino fundamentalmente de la **educación y la formación continua de los actores rurales**. Los agricultores,

técnicos, extensionistas y comunidades campesinas constituyen los protagonistas reales de la conservación y manejo responsable de los recursos edáficos. Sin su conocimiento, compromiso y capacidad para aplicar prácticas sostenibles, cualquier estrategia normativa o tecnológica carece de impacto duradero.

#### 4. La educación rural como base de la sostenibilidad

El **conocimiento del suelo** —su estructura, fertilidad, degradación y potencial productivo— debe ser un eje transversal en la educación agrícola y ambiental. En América Latina, los programas de formación rural han estado históricamente centrados en la productividad a corto plazo, priorizando el rendimiento sobre la conservación. Este enfoque debe transformarse hacia una **educación agroecológica integral**, donde el suelo sea comprendido como un **recurso vivo, finito y multifuncional**.

La educación rural, en este sentido, debe fomentar:

- La **alfabetización edáfica**, es decir, la comprensión de los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo.
- La **valoración del suelo como patrimonio común**, parte del capital natural del territorio.
- La **responsabilidad intergeneracional** frente al uso sostenible de la tierra y los recursos hídricos asociados.
- La **integración de saberes ancestrales y científicos**, reconociendo el conocimiento tradicional campesino sobre rotación, barbecho, conservación de humedad y uso de abonos naturales.

En el contexto ecuatoriano, el fortalecimiento de las **escuelas agrícolas comunitarias** y de los **institutos técnicos agropecuarios** resulta esencial para garantizar la transferencia del conocimiento científico adaptado a las realidades locales. La **educación dual**, que combina formación teórica con práctica en fincas experimentales, representa un modelo eficaz para vincular el aprendizaje con la innovación territorial.

#### 5. Innovación tecnológica y gestión del conocimiento

La innovación agrícola sostenible no se limita a la incorporación de tecnologías digitales, sino que abarca el desarrollo de **soluciones adaptadas a las condiciones agroecológicas y socioeconómicas de cada región**. En este sentido, la gestión del suelo requiere enfoques interdisciplinarios que integren:

- **Ciencia del suelo y microbiología edáfica**, orientadas a la recuperación de la fertilidad natural.

- **Biotecnología agrícola**, enfocada en biofertilizantes, micorrizas y compost mejorado.
- **Tecnologías de información geográfica (SIG)** y teledetección, para la planificación territorial y el monitoreo de la degradación.
- **Agricultura de precisión y sensores in situ**, que permiten aplicar fertilizantes y agua en función de la variabilidad espacial del suelo.

La innovación debe ser comprendida como un **proceso social y territorial**, no solo tecnológico. Esto implica construir redes de conocimiento entre universidades, centros de investigación, gobiernos locales y organizaciones campesinas. Las plataformas colaborativas de innovación —como los **laboratorios vivos rurales (Living Labs)** o las **escuelas de campo para agricultores (ECA)**— facilitan el intercambio horizontal de saberes, donde los agricultores dejan de ser receptores pasivos y se convierten en **co-creadores de conocimiento aplicado**.

**Ejemplos notables en Ecuador incluyen:**

- Las **Escuelas de Campo del MAG y FAO**, que han capacitado a miles de productores en fertilización orgánica, compostaje y manejo agroforestal.
- Los **proyectos de innovación participativa** impulsados por el INIAP, que integran análisis de suelos, bioinsumos y TIC rurales.
- Las **alianzas universidad–comunidad**, especialmente en zonas andinas, donde se aplican sensores de humedad, estaciones meteorológicas y drones para el manejo de suelos agrícolas y forestales.

## 6. Extensión agrícola y transferencia tecnológica

La **extensión agrícola** constituye el puente operativo entre la ciencia y la práctica productiva. Su misión no es únicamente difundir innovaciones, sino **acompañar al productor en el proceso de adaptación tecnológica**, considerando factores culturales, económicos y ambientales. Un sistema de extensión moderno debe caracterizarse por:

- La **presencia territorial descentralizada**, articulada a los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD) y las universidades locales.
- El **uso de metodologías participativas**, como talleres, demostraciones de campo y parcelas piloto.
- La **incorporación de herramientas digitales**, como aplicaciones móviles, sistemas de alerta agroclimática y plataformas de diagnóstico de suelos en línea.

- La **retroalimentación científica**, mediante la recolección de datos de campo que nutran la investigación aplicada.

El nuevo paradigma de **extensión agroecológica** promueve la diversificación de cultivos, la reducción del uso de agroquímicos y el aprovechamiento de los recursos locales. Se trata de una extensión que educa, pero también escucha; que orienta, pero también aprende del territorio.

## 7. Educación ambiental y cultura del suelo

El fortalecimiento de una **cultura del suelo** requiere una estrategia educativa multisectorial, que involucre escuelas, universidades, instituciones públicas y medios de comunicación. La sensibilización desde la infancia sobre la importancia del suelo —su conservación, función ecológica y relación con el agua y el clima— es crucial para formar generaciones conscientes del valor de este recurso.

En Ecuador, programas como “**Escuelas Sostenibles**” y proyectos de **educación ambiental del MAATE y SENESCYT** han comenzado a incluir módulos sobre **biodiversidad del suelo, erosión y compostaje doméstico**. Sin embargo, aún se requiere una mayor articulación entre el sistema educativo formal y la extensión agraria, de modo que el conocimiento ambiental no quede aislado, sino que se traduzca en prácticas reales en los territorios rurales.

## 8. Desafíos y proyecciones

A pesar de los avances, persisten desafíos estructurales:

- Brecha tecnológica y digital entre agricultores grandes y pequeños.
- Insuficiente cobertura del sistema de extensión pública y limitada capacitación continua.
- Escasa inversión en investigación aplicada y biotecnología del suelo.
- Necesidad de fortalecer los mecanismos de vinculación universidad–comunidad.
- Las proyecciones apuntan hacia una **educación agroecológica digitalizada**, apoyada en plataformas virtuales, simuladores de manejo de suelos, sensores educativos y modelos predictivos de fertilidad. La formación de **técnicos rurales con competencias en inteligencia artificial, SIG y microbiología del suelo** será determinante en la Agricultura 5.0.
- El futuro de la sostenibilidad agrícola, por tanto, dependerá tanto del conocimiento como de la tecnología, pero sobre todo de la **capacidad de los pueblos rurales para apropiarse de la ciencia y**

**transformarla en sabiduría productiva**, en equilibrio con el territorio.

## 8.1 Indicadores de gobernanza del suelo

### *Introducción: gobernanza como eje de sostenibilidad*

La gobernanza del suelo se define como el conjunto de políticas, instituciones, normas, prácticas y actores que influyen en el acceso, uso y gestión de los recursos edáficos. A diferencia de la gestión técnica del suelo, la gobernanza aborda los **procesos de toma de decisiones y de participación social** que determinan cómo se planifica, se regula y se conserva este recurso estratégico.

En el contexto de la sostenibilidad agrícola y ambiental, la gobernanza del suelo busca equilibrar tres dimensiones fundamentales:

- **La productividad agrícola**, que garantiza la seguridad alimentaria y los medios de vida rurales.
- **La conservación ambiental**, orientada a mantener la capacidad de los suelos para sostener la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.
- **La equidad social**, vinculada al acceso justo y seguro a la tierra y a los beneficios derivados de su uso.

Medir la gobernanza de los suelos, por tanto, implica no solo evaluar variables físicas o químicas, sino **analizar los procesos institucionales, normativos y sociales** que permiten o limitan una gestión sostenible del territorio.

## 8.2 Enfoques internacionales de medición: el marco FAO-SWSR

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), a través de la Global Soil Partnership (GSP) y el Sistema Mundial de Información sobre los Recursos del Suelo (SWSR, por sus siglas en inglés: Soil and Water Systems for Resilience), ha desarrollado indicadores estandarizados para evaluar la gobernanza y sostenibilidad del suelo a nivel global y nacional.

El Marco FAO-SWSR establece cinco pilares principales de evaluación:

| PILAR                                 | ENFOQUE DE EVALUACIÓN                                       | INDICADORES PRINCIPALES                                                                            |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1. PRODUCTIVIDAD SOSTENIBLE</b>    | Evaluación del uso agrícola, erosión y manejo de nutrientes | Índice de degradación del suelo (GLADIS), balance de nutrientes, rendimiento sostenido             |
| <b>2. SALUD Y CALIDAD DEL SUELO</b>   | Evaluación de propiedades físicas, químicas y biológicas    | Contenido de carbono orgánico, estructura, biodiversidad microbiana                                |
| <b>3. GOBERNANZA E INSTITUCIONES</b>  | Análisis de políticas, leyes y participación social         | Existencia de políticas nacionales de suelo, grado de implementación, inclusión de actores locales |
| <b>4. MONITOREO Y DATOS</b>           | Gestión de información y transparencia                      | Cobertura de inventarios de suelos, disponibilidad pública de datos                                |
| <b>5. EDUCACIÓN Y SENSIBILIZACIÓN</b> | Capacidad institucional y cultura del suelo                 | Programas de educación y extensión, integración del tema suelo en políticas educativas             |

De manera específica, la **FAO** propone el uso de los **Indicadores de Gobernanza del Suelo (Soil Governance Indicators, SGI)**, los cuales permiten evaluar de manera comparativa los avances de los países hacia la **Estrategia Mundial de Suelos (GSP/FAO, 2016)** y su alineación con los **Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)**, particularmente los ODS 2 (Hambre Cero), 13 (Acción por el Clima) y 15 (Vida de Ecosistemas Terrestres).

### 8.3 Indicadores operativos de gobernanza del suelo

Los **SGI** se agrupan en tres dimensiones complementarias: **institucional, normativa y participativa**. A continuación, se presentan sus componentes más relevantes para la evaluación en el contexto ecuatoriano:

### ***a) Dimensión institucional***

Evalúa la existencia, capacidad y coordinación de las instituciones que gestionan el recurso suelo:

- Existencia de una **política nacional o plan de acción de manejo sostenible de suelos (MSS)**.
- Presencia de un **organismo rector o autoridad de suelos** con competencias definidas.
- Asignación de **presupuesto nacional o local** destinado al manejo y monitoreo edáfico.
- Integración de los suelos en los **planes de desarrollo territorial y ordenamiento (PDOT)**.

### ***b) Dimensión normativa***

Analiza el marco jurídico y regulatorio aplicable:

- Inclusión explícita del **uso sostenible del suelo** en leyes ambientales, agrícolas y de planificación.
- Existencia de **reglamentos técnicos de conservación y control de erosión**.
- Mecanismos de **fiscalización y sanción** frente a prácticas degradantes (deforestación, quema, sobrepastoreo).
- Coherencia entre políticas de tierras, agua y agricultura.

### ***c) Dimensión participativa y social***

Mide el grado de involucramiento ciudadano y la equidad en la toma de decisiones:

- Participación de **comunidades campesinas, indígenas y afrodescendientes** en procesos de planificación.
- Presencia de **mesas locales de gestión del suelo y agua**.
- Acceso público a información sobre calidad y uso de suelos (transparencia de datos).
- Mecanismos de resolución de conflictos sobre uso y tenencia.

## **8.4 Adaptación al contexto nacional ecuatoriano**

El Ecuador, como país miembro de la **Alianza Mundial por el Suelo**, ha avanzado en la integración de los principios de gobernanza edáfica dentro de su **marco normativo ambiental y agrario**. Entre los principales instrumentos destacan:

- **Código Orgánico del Ambiente (2017)**: establece el manejo sostenible del suelo como un principio obligatorio, reconociendo su función ecológica.
- **Plan Nacional de Desarrollo Agropecuario Sostenible (2022–2030)**: promueve la conservación del suelo agrícola y la restauración de tierras degradadas.
- **Estrategia Nacional de Suelos y Agua (MAATE, 2021)**: incorpora indicadores de degradación y monitoreo edáfico en coordinación con los GAD.
- **Sistemas de Información Ambiental y Agropecuaria (SUIA, SNI, Agrocalidad)**: proveen bases de datos interoperables para el seguimiento de uso y calidad de suelos.

En este marco, se pueden establecer **indicadores nacionales de gobernanza del suelo** alineados con los estándares FAO-SWSR, tales como:

| INDICADOR                                 | DEFINICIÓN                                                       | FUENTE NACIONAL DE DATOS |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| EXISTENCIA DE POLÍTICA NACIONAL DE SUELOS | Documento formal adoptado con objetivos, metas y presupuesto     | MAATE / MAG              |
| INTEGRACIÓN DE SUELOS EN PDOT CANTONALES  | % de GAD con zonificación edáfica y capacidad de uso incorporada | SENPLADES / GAD          |
| PARTICIPACIÓN SOCIAL EN GESTIÓN DE SUELOS | % de proyectos con mesas o comités locales activos               | MAATE / PROAmazonía      |
| TRANSPARENCIA Y ACCESO A DATOS EDÁFICOS   | Disponibilidad pública de mapas y reportes en línea              | SUIA / INIAP             |
| MONITOREO PERIÓDICO DE DEGRADACIÓN        | Número de sitios con mediciones edáficas anuales                 | INAMHI / MAG / FAO       |

## 8.5 Metodologías para el seguimiento local

A escala local o cantonal, los **indicadores FAO-SWSR** pueden adaptarse mediante metodologías participativas que integren actores institucionales, técnicos y comunitarios. Las estrategias más efectivas incluyen:

- **Matrices de evaluación participativa**, donde los agricultores califican las prácticas de manejo, erosión, compactación y cobertura vegetal en sus fincas.
- **Mapeo participativo de suelos y conflictos de uso**, utilizando sistemas GPS y plataformas SIG de libre acceso (QGIS, GeoODK).
- **Monitoreo biofísico comunitario**, con mediciones periódicas de materia orgánica, densidad aparente y cobertura vegetal.
- **Indicadores socio-institucionales locales**, como número de talleres de capacitación, inversión municipal en conservación y alianzas público-comunitarias.
- **Sistemas locales de observación de suelos (SLOS)**, en los que universidades, escuelas agrícolas y GAD implementan estaciones de monitoreo para integrar datos en la nube.

Estas metodologías permiten traducir los marcos internacionales en herramientas **concretas, prácticas y adaptadas al territorio**, fortaleciendo la gobernanza desde abajo hacia arriba (“bottom-up governance”).

## 8.6 Interpretación de los indicadores y toma de decisiones

Los indicadores de gobernanza del suelo deben entenderse como **instrumentos de apoyo a la gestión pública y comunitaria**, no como fines en sí mismos. Su análisis debe alimentar la toma de decisiones en varios niveles:

- **Local (GAD parroquial o cantonal)**: priorización de áreas críticas y diseño de proyectos de conservación.
- **Regional**: articulación de corredores productivos sostenibles y restauración de cuencas.
- **Nacional**: formulación de políticas de incentivos, inversión y control ambiental.
- **Internacional**: reporte a los ODS, a la FAO y a convenios multilaterales (Desertificación, Cambio Climático, Biodiversidad).
- La **interpretación integral** de los indicadores —combinando datos biofísicos, institucionales y sociales— ofrece una visión multidimensional del estado del suelo y su gobernanza, permitiendo identificar **brechas, fortalezas y oportunidades de intervención**.

## 8.7 Conclusión: hacia una gobernanza del suelo basada en evidencia

La construcción de una **gobernanza efectiva del suelo** requiere datos confiables, instituciones fortalecidas y participación activa de la sociedad civil. Los indicadores FAO-SWSR y su adaptación local proporcionan una herramienta sólida para **evaluar y mejorar las políticas de manejo sostenible**, conectando la ciencia del suelo con la gestión pública.

En Ecuador, la implementación de sistemas locales de monitoreo y la integración de indicadores en los PDOT constituyen pasos esenciales para avanzar hacia una **agricultura sostenible, resiliente y territorialmente planificada**.

Solo a través de una gobernanza basada en evidencia, articulada y participativa, el suelo podrá seguir cumpliendo su función vital como soporte de la vida, garante de la soberanía alimentaria y componente clave de la sostenibilidad ecológica.

## 9. Casos de éxito y estrategias regionales

### 9.1 Ecuador: conservación edáfica y gobernanza territorial

En Ecuador, el manejo sostenible de suelos se ha fortalecido progresivamente gracias a la convergencia de políticas nacionales, programas regionales y experiencias comunitarias exitosas. Entre las más destacadas se encuentran:

#### *a) Programa Nacional de Manejo Sostenible del Suelo y Agua (MAATE, 2021–2025)*

Implementado por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), este programa impulsa la **restauración de tierras degradadas** mediante prácticas agroecológicas y tecnologías de conservación. Se articula con los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD) y universidades locales para desarrollar **planes cantonales de manejo edáfico**, incorporando indicadores de degradación, cobertura vegetal, erosión y contenido de carbono orgánico. Hasta 2024, se reportan más de **32.000 hectáreas recuperadas** mediante prácticas de terrazas, abonos orgánicos, revegetación con especies nativas y manejo agroforestal.

#### *b) Proyecto PROAmazonía (MAATE-FAO-PNUD, 2018–2026)*

Este proyecto representa una experiencia modelo de **integración entre gobernanza ambiental, conservación del suelo y mitigación climática**. En provincias como Pastaza, Zamora Chinchipe y Napo, se han implementado

sistemas silvopastoriles y agroforestales que reducen la erosión y aumentan la infiltración. Los resultados demuestran incrementos promedio del **20 % en materia orgánica del suelo** y del **15 % en retención hídrica** tras cuatro años de intervención. Asimismo, se fortalecieron **mesas locales de manejo de suelo y agua**, integradas por comunidades indígenas, técnicos y GAD, fomentando una gobernanza participativa.

### ***c) Agricultura de conservación en la Sierra Central***

En provincias como Cotopaxi y Chimborazo, las universidades y asociaciones campesinas han desarrollado modelos de **agricultura de conservación (AC)** basados en siembra directa, rotación de cultivos y cobertura permanente. Los resultados demuestran reducciones de **30–40 % en erosión laminar** y mejoras en la **estabilidad estructural y densidad aparente del suelo**. Estas experiencias se articulan con los **Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT)**, integrando mapas de capacidad de uso y zonificación agroecológica.

## **9.2 Cuba: manejo integral y políticas de restauración edáfica**

Cuba constituye uno de los referentes latinoamericanos en materia de **política pública de suelos y educación edafológica**. Desde la promulgación del **Decreto-Ley 47/1981 de Conservación y Mejoramiento del Suelo y su Fertilidad**, el país ha desarrollado un sistema nacional de monitoreo, capacitación y control edáfico.

### ***a) Programa Nacional de Suelos (MINAG, 2000–actualidad)***

Este programa, ejecutado por el Ministerio de la Agricultura (MINAG), coordina la evaluación periódica de la calidad del suelo en todo el territorio nacional.

Más de **1.000 estaciones de muestreo** reportan datos de pH, contenido de materia orgánica, salinidad y erosión, alimentando el **Sistema Nacional de Información de Suelos (SINFERS)**. Gracias a este sistema, Cuba mantiene un control técnico riguroso que permite identificar áreas degradadas y definir **zonas prioritarias de restauración**.

### ***b) Estrategias de manejo biológico***

El país promueve el uso de **biofertilizantes, compost y micorrizas** a través del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA) y el Instituto de Suelos. Estos insumos biológicos han reemplazado hasta un **40 % de los fertilizantes químicos** en cooperativas agropecuarias, mejorando la salud del suelo y reduciendo la dependencia de importaciones.

### ***c) Extensión agraria y capacitación***

Cuba ha desarrollado un modelo educativo en el que los **técnicos de suelo trabajan junto a los productores**, brindando asistencia continua. Los Centros Universitarios Municipales (CUM) y las Escuelas de Capacitación Agrícola ofrecen módulos sobre **biología del suelo, fertilización racional y conservación edáfica**, consolidando una cultura agronómica sostenible. Este modelo ha permitido que más del **70 % de las áreas agrícolas del país** cuenten con planes de manejo de suelo aprobados por el Estado.

## **9.3 Colombia: gestión integrada del territorio y conservación agroecológica**

Colombia ha avanzado en políticas de **restauración edáfica y gestión del territorio** a través de programas que vinculan agricultura sostenible, ordenamiento territorial y adaptación climática.

### ***a) Política Nacional de Gestión Integral del Suelo (PNGIS, 2020–2030)***

Esta política define el suelo como un recurso estratégico de seguridad nacional y establece mecanismos de coordinación interinstitucional entre los Ministerios de Ambiente, Agricultura y Planeación Nacional. Promueve la elaboración de **Planes Departamentales de Manejo del Suelo (PDMS)** y fomenta la inversión en restauración mediante **créditos verdes** y pagos por servicios ecosistémicos (PSE).

### ***b) Proyecto “Suelo Vivo” (FAO–MinAmbiente, 2019–2024)***

Desarrollado en los departamentos de Boyacá, Huila y Nariño, este proyecto integra prácticas de **biofertilización, agricultura regenerativa y sistemas agroforestales**.

Los resultados técnicos muestran aumentos de **25 % en carbono orgánico del suelo**, mejoras del **30 % en infiltración de agua** y reducción de la erosión superficial hasta en **50 %**. El enfoque participativo permitió crear **escuelas de campo para agricultores (ECAs)**, donde productores locales realizan mediciones y seguimiento de indicadores de calidad del suelo.

### ***c) Observatorio Colombiano de Suelos (OCS)***

Liderado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el OCS centraliza información edáfica y geoespacial del país, accesible públicamente. Esta plataforma digital permite **mapear procesos de degradación**, estimar emisiones de carbono y orientar políticas de ordenamiento agroambiental.

Colombia se convierte así en un referente regional de **gestión digital y científica del suelo** al servicio de la planificación sostenible.

#### 9.4 Síntesis comparativa regional

| PAÍS     | ESTRATEGIA PRINCIPAL                                          | LOGROS DESTACADOS                                     | LECCIONES APLICABLES                                 |
|----------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| ECUADOR  | Integración de suelos en PDOT y programas de restauración     | 32.000 ha recuperadas; mejora de materia orgánica     | Fortalecer monitoreo local y vinculación comunitaria |
| CUBA     | Sistema nacional de monitoreo y fertilización biológica       | 70 % del área agrícola con planes de manejo aprobados | Importancia de la educación y control estatal        |
| COLOMBIA | Política nacional de gestión del suelo y observatorio digital | Aumento de C orgánico y reducción de erosión          | Uso de datos abiertos e integración tecnológica      |

### 10. Conclusiones: hacia una política integrada de suelos sostenibles

El análisis regional evidencia que los **sistemas de gobernanza del suelo** exitosos comparten tres elementos estructurales: **institucionalidad sólida, participación activa y gestión basada en evidencia científica**. En los tres países analizados, la sostenibilidad edáfica se ha logrado mediante la **articulación entre políticas públicas, educación técnica y tecnología de monitoreo**, demostrando que la gestión del suelo requiere un enfoque integral.

#### 8.1 Elementos clave de una política integrada

1. **Marco legal coherente y multisectorial**, que vincule los ámbitos ambiental, agrario y territorial.
2. **Sistema nacional de información edáfica interoperable**, con datos abiertos, georreferenciados y actualizados.

3. **Incentivos económicos verdes**, como créditos sostenibles, seguros climáticos y pagos por servicios ecosistémicos.
4. **Capacitación continua y extensión agrícola**, que promueva la educación en manejo sostenible y microbiología del suelo.
5. **Gobernanza participativa**, que reconozca el papel de los GAD, comunidades rurales y pueblos indígenas en la gestión del territorio.
6. **Integración tecnológica**, incorporando agricultura de precisión, teledetección e inteligencia artificial para la planificación del uso del suelo.

## 8.2 Desafíos para América Latina y el Ecuador

A pesar de los avances, persisten brechas significativas:

- **Descoordinación interinstitucional** entre los sectores ambiente, agricultura y planificación.
- **Limitada disponibilidad de datos edáficos actualizados** a escala local.
- **Escasa inversión pública** en restauración y monitoreo.
- **Débil inclusión de mujeres y jóvenes rurales** en procesos de toma de decisiones.
- **Insuficiente adaptación al cambio climático**, especialmente en zonas áridas y degradadas.

Frente a ello, se requiere consolidar un **enfoque de política de Estado**, que trascienda gobiernos y combine conocimiento científico con saberes locales. El Ecuador posee una oportunidad estratégica de convertirse en un **referente regional de gestión sostenible de suelos**, al integrar sus programas de restauración con los de digitalización agrícola y gobernanza territorial.

## 8.3 Proyección hacia el futuro

El horizonte de la gestión sostenible de suelos en América Latina se orienta hacia la **Agricultura 5.0**, donde la digitalización, la inteligencia artificial y la gobernanza participativa convergen. Una **política integrada de suelos sostenibles** debe concebirse como un sistema dinámico que combine:

- **Datos en tiempo real**, obtenidos de sensores y satélites.
- **Modelos predictivos** de degradación y fertilidad.
- **Participación social**, garantizando justicia ambiental y seguridad alimentaria.

En última instancia, la sostenibilidad del suelo es la sostenibilidad de la vida. Fortalecer su gobernanza significa asegurar la base productiva y ecológica de las generaciones futuras.

# CAPÍTULO X: QUÍMICA DE SUELOS Y SU APLICACIÓN EN LA INGENIERÍA AMBIENTAL

## 1. Introducción: el suelo como sistema químico y ambiental

El suelo constituye un sistema químico complejo, dinámico y vivo, que actúa simultáneamente como **reactor natural**, **reservorio de nutrientes**, **filtro biogeoquímico** y **regulador ambiental**. En su estructura se desarrollan innumerables reacciones de adsorción, intercambio iónico, precipitación, oxidación–reducción y complejación que determinan el destino de los nutrientes, contaminantes y elementos traza presentes en el ambiente. Desde esta perspectiva, el suelo no solo es un soporte físico para la vegetación, sino un **componente esencial de los ecosistemas terrestres y un elemento clave en la sostenibilidad ambiental**.

La **química del suelo** permite entender cómo los procesos moleculares influyen directamente en la fertilidad, la productividad agrícola, la calidad del agua y del aire, así como en la mitigación del cambio climático. Los suelos participan activamente en el **ciclo global del carbono y del nitrógeno**, regulando el almacenamiento y liberación de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y el metano ( $\text{CH}_4$ ). Estos procesos, controlados por interacciones químicas y biológicas, determinan el equilibrio climático y ecológico del planeta.

Desde la perspectiva de la **Ingeniería Ambiental**, la comprensión de los procesos químicos del suelo es indispensable para:

- **Evaluar y mitigar la contaminación** producida por actividades agrícolas, industriales, mineras o urbanas.
- **Diseñar estrategias de remediación** de suelos degradados mediante procesos fisicoquímicos y biogeoquímicos.
- **Optimizar el uso de fertilizantes** y enmiendas, evitando la eutrofización de cuerpos de agua.
- **Gestionar residuos sólidos y lixiviados**, considerando la capacidad del suelo para inmovilizar o transformar sustancias tóxicas.
- **Controlar la salinización y acidificación** derivadas de prácticas agrícolas intensivas.

El suelo puede considerarse un **reactor natural abierto**, donde convergen flujos de materia y energía procedentes de la atmósfera, la hidrosfera y la biosfera. En su interior se desarrollan procesos simultáneos de oxidación y reducción, hidrólisis, intercambio catiónico, formación de complejos y reacciones ácido–base, que transforman los elementos y determinan su

disponibilidad o toxicidad. La interacción entre la **fase sólida (minerales y materia orgánica)**, la **fase líquida (solución del suelo)** y la **fase gaseosa (aire del suelo)** define la dinámica de los iones, la movilidad de contaminantes y la actividad biológica.

En el contexto ecuatoriano, donde coexisten **suelos volcánicos de la Sierra, arenosos en la Costa y lateríticos en la Amazonía**, los procesos químicos adquieren particular relevancia. Los suelos andinos, por ejemplo, presentan una **alta capacidad de intercambio catiónico** y una notable **retención de fósforo** debido a la presencia de alofanos y óxidos de hierro y aluminio. En contraste, los suelos amazónicos, fuertemente lixiviados y ácidos, tienden a presentar **baja saturación de bases** y deficiencias nutricionales severas, lo que obliga a una gestión química precisa para evitar la degradación.

El estudio de la química del suelo permite, por tanto, establecer **criterios técnicos para la gestión sostenible del territorio**, integrando variables de fertilidad, contaminación, calidad del agua subterránea y resiliencia ecológica. En esta interrelación, el ingeniero ambiental actúa como mediador entre la ciencia del suelo y las políticas de sostenibilidad, aplicando los principios de la química ambiental para restaurar ecosistemas degradados, diseñar sistemas productivos menos contaminantes y evaluar los impactos de las actividades humanas sobre los recursos naturales.

En síntesis, comprender el suelo desde su dimensión química implica reconocerlo como un **sistema vivo de reacciones naturales** que sostiene la biosfera, filtra los contaminantes, almacena carbono y nutre los ecosistemas. Su estudio interdisciplinario, desde la óptica ambiental, constituye una herramienta fundamental para transitar hacia modelos de desarrollo basados en la **eficiencia, la conservación y la sostenibilidad**.

## 2. Componentes químicos del suelo

El suelo es un sistema polifásico compuesto por **materia sólida, líquida y gaseosa**, cuyas interacciones químicas determinan su comportamiento físico, biológico y ambiental. Cada fase cumple un papel específico, pero su equilibrio dinámico es lo que garantiza la fertilidad, la estabilidad estructural y la capacidad del suelo para actuar como **filtro y amortiguador ecológico** frente a contaminantes o cambios en el entorno.

### 2.1 Fases del suelo: interacciones y equilibrios

**a) Fase sólida:** Constituye entre el **45 y 50 % del volumen total del suelo** y está integrada por una fracción **mineral** (proveniente de la meteorización de rocas) y una fracción **orgánica** (restos de organismos en distintos grados de

descomposición). La fase sólida define la textura, la estructura y la capacidad de retención de nutrientes.

**b) Fase líquida o solución del suelo:** Corresponde al agua que ocupa los poros y contiene **iones, compuestos orgánicos disueltos y gases**. Esta solución funciona como el **medio de transporte** para los nutrientes, los productos de disolución mineral y los metabolitos microbianos. Los procesos de **adsorción, intercambio iónico y disolución–precipitación** regulan su composición.

**c) Fase gaseosa:** Ocupa entre **20 y 25 % del volumen del suelo** y está compuesta principalmente por **O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y vapor de agua**. La composición gaseosa influye en la respiración microbiana, la oxidación de compuestos y el potencial redox. Su equilibrio con la atmósfera controla la aireación y, por tanto, la actividad biológica y química interna.

El equilibrio entre estas tres fases es dinámico. Por ejemplo, un aumento de la humedad desplaza el aire de los poros, reduciendo el oxígeno y favoreciendo condiciones **reductoras** que transforman el hierro férrico (Fe<sup>3+</sup>) en ferroso (Fe<sup>2+</sup>), afectando la disponibilidad de nutrientes y la movilidad de metales pesados. En cambio, un suelo excesivamente seco limita las reacciones de disolución e intercambio iónico, reduciendo la fertilidad efectiva.

## 2.2 Minerales primarios y secundarios

Los minerales constituyen la **matriz inorgánica** del suelo y determinan su composición química básica.

**Minerales primarios:** son los heredados directamente del material parental (rocas ígneas o metamórficas). Entre los más comunes se encuentran los **feldespatos, cuarzo, micas y anfíboles**. Liberan iones como K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> y SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup> mediante meteorización química.

**Minerales secundarios:** se forman por la alteración de los anteriores y comprenden principalmente **arcillas, óxidos e hidróxidos de Fe y Al**, los cuales controlan la **capacidad de intercambio catiónico (CIC)** y la **adsorción de fosfatos y metales**.

Entre las **arcillas** más relevantes destacan:

- **Caolinita (1:1):** de baja CIC, estable en climas tropicales húmedos.
- **Montmorillonita (2:1):** con alta CIC y capacidad expansiva.
- **Ilita y vermiculita:** intermedias, con propiedades coloidales útiles en retención de nutrientes.

En suelos del Ecuador, los **óxidos de hierro** ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeOOH}$ ) y de **aluminio** ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) son especialmente abundantes en zonas tropicales y volcánicas, donde confieren coloraciones rojizas o amarillentas. Estos minerales, aunque confieren estabilidad estructural, pueden inmovilizar nutrientes esenciales (como P y Mo) debido a su alta afinidad química por los aniones fosfatados.

### 2.3 Materia orgánica del suelo (MOS)

La **materia orgánica** representa entre **1 y 10 %** de la masa total del suelo y constituye un componente clave del equilibrio químico y biológico. Está formada por compuestos carbonados en distintas etapas de descomposición:

- **Huminas:** fracción insoluble, de alto peso molecular, fuertemente unida a minerales arcillosos. Actúa como reservorio de carbono estable.
- **Ácidos húmicos:** solubles en medio alcalino; presentan grupos funcionales (carboxilos, fenólicos) que les confieren gran **capacidad de intercambio catiónico** y capacidad para formar **quelatos metálicos** con Fe, Cu, Zn y Mn.
- **Ácidos fúlvicos:** de menor peso molecular, solubles en todo el rango de pH y altamente móviles, desempeñan un papel relevante en la **movilización de nutrientes y contaminantes**.

La MOS regula el **pH**, la **retención de agua**, la **agregación estructural** y la **actividad microbiana**. En la Ingeniería Ambiental, su estudio es esencial para comprender la **sorción de contaminantes orgánicos (plaguicidas, hidrocarburos, metales)** y su papel en los procesos de **biorremediación**. Los suelos ricos en humus, como los andosoles ecuatorianos, presentan una alta capacidad para inmovilizar contaminantes, actuando como “biofiltros naturales”.

### 2.4 La solución del suelo: equilibrio iónico y ácido-base

La **solución del suelo** es el medio en el cual ocurren la mayoría de las reacciones químicas y biológicas. Contiene los principales **cationes** ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ) y **aniones** ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SiO}_4^{4-}$ ). Su composición varía en función del material parental, el manejo agronómico, las precipitaciones y la actividad microbiana.

- El **equilibrio ácido-base** determina la reactividad química del suelo y está estrechamente vinculado al **pH**.
- En **suelos ácidos (pH < 6)** predominan iones  $\text{H}^+$  y  $\text{Al}^{3+}$ , que pueden ser tóxicos para las raíces y reducen la disponibilidad de fósforo y molibdeno.

- En **suelos alcalinos (pH > 7.5)**, el exceso de carbonatos y sodio provoca precipitación de micronutrientes (Fe, Zn, Mn) y dispersión de arcillas.
- Los **suelos neutros o ligeramente ácidos (pH 6–7)** presentan las condiciones óptimas para la mayoría de los cultivos y una elevada actividad microbiana.

El mantenimiento de este equilibrio depende de procesos naturales (meteorización, intercambio iónico, respiración radicular) y antrópicos (fertilización, encalado, contaminación). En Ingeniería Ambiental, el control del pH y de los **potenciales redox (Eh)** es esencial para gestionar la movilidad de contaminantes: por ejemplo, en suelos reductores los metales pesados pueden solubilizarse, mientras que en ambientes oxidantes tienden a precipitar o adsorberse en óxidos.

## 2.5 Síntesis aplicada al contexto ecuatoriano

En los **suelos volcánicos andinos**, la coexistencia de **alofanas, humus y alta humedad** crea un sistema químicamente activo y estable, con alta capacidad de adsorción de fosfatos. En los **suelos costeros**, predominan arenas cuarzosas con baja capacidad de retención iónica, por lo que la gestión de fertilidad depende de la incorporación de materia orgánica. En la **Amazonía**, los suelos ácidos y lixiviados requieren manejo químico cuidadoso (encalado y biofertilización) para evitar la pérdida de bases y el agotamiento de nutrientes.

El conocimiento de los **componentes químicos del suelo** constituye así una base indispensable para los ingenieros ambientales, pues permite diseñar **estrategias de uso racional de nutrientes, control de contaminación y recuperación de suelos degradados**.

## 3. Propiedades químicas relevantes para la gestión ambiental

Las propiedades químicas del suelo determinan su comportamiento frente a procesos naturales y antrópicos, así como su capacidad para sostener ecosistemas y mitigar impactos ambientales. En el contexto de la Ingeniería Ambiental, estas propiedades son esenciales para evaluar la **calidad del suelo**, su **vulnerabilidad ante contaminantes** y su potencial como **filtro, buffer o sumidero** de sustancias químicas.

A continuación, se presentan las propiedades químicas más relevantes para la gestión ambiental de los suelos ecuatorianos y latinoamericanos.

### 3.1 pH y capacidad buffer del suelo

El **pH del suelo** es un indicador fundamental del equilibrio ácido–base del sistema edáfico. Representa la concentración de iones hidrógeno ( $H^+$ ) en la solución del suelo y se expresa en una escala de 0 a 14.

- **Suelos ácidos (pH < 6):** comunes en regiones húmedas tropicales, con alta lixiviación de bases y presencia de  $Al^{3+}$  y  $Fe^{3+}$ .
- **Suelos neutros (pH 6–7):** óptimos para la mayoría de los cultivos y la actividad microbiana.
- **Suelos alcalinos (pH > 7.5):** frecuentes en zonas áridas o costeras con acumulación de carbonatos y sodio.

El **pH condiciona la disponibilidad de nutrientes** (por ejemplo, el fósforo se inmoviliza a pH extremos) y la **movilidad de contaminantes**, como metales pesados, que se solubilizan en ambientes ácidos y se precipitan en alcalinos.

La **capacidad buffer** o capacidad amortiguadora se refiere a la **resistencia del suelo a los cambios de pH**. Está determinada por la cantidad y naturaleza de los **coloides minerales (arcillas, óxidos)** y la **materia orgánica**. Un suelo con buena capacidad buffer puede neutralizar ácidos (como los provenientes de lluvias ácidas o lixiviados mineros) y evitar fluctuaciones bruscas de pH, protegiendo tanto a las plantas como a los microorganismos del suelo.

En el Ecuador, los **andosoles volcánicos** presentan una extraordinaria capacidad buffer debido a la presencia de alofanos y materia orgánica activa, mientras que los **suelos arenosos costeros** carecen de este poder amortiguador, siendo más vulnerables a acidificación o alcalinización rápida.

### 3.2 Capacidad de intercambio catiónico (CIC) y aniónico (CIA)

La **capacidad de intercambio catiónico (CIC)** expresa la cantidad total de cationes (positivos) que un suelo puede adsorber y liberar reversiblemente. Se mide en **cmol(+)/kg** y depende principalmente del tipo de arcilla, la materia orgánica y el pH. Los principales cationes intercambiables son  **$Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $H^+$  y  $Al^{3+}$** .

Una **alta CIC** implica:

- Mayor **fertilidad química** y disponibilidad de nutrientes.
- Mayor capacidad para **retener contaminantes metálicos**, reduciendo su movilidad.
- Efecto de **amortiguador químico** frente a lixiviación o contaminación.

Por el contrario, suelos con baja CIC (arenosos o con bajo contenido de humus) son más propensos a la degradación y a la contaminación por lixiviación de agroquímicos.

La **capacidad de intercambio aniónico (CIA)**, menos frecuente pero relevante en suelos tropicales, mide la capacidad del suelo para adsorber aniones como  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . En suelos ricos en óxidos de hierro y aluminio, esta propiedad puede inmovilizar el fósforo, reduciendo su disponibilidad para las plantas, pero aumentando la **retención de contaminantes aniónicos**.

**Ejemplo aplicado:** En suelos de la Amazonía ecuatoriana, la alta CIA debida a óxidos de Fe y Al permite retener fosfatos y arseniatos, actuando como una **barrera geoquímica natural** frente a contaminantes. En cambio, los suelos de la Costa con baja CIC muestran alta vulnerabilidad a la lixiviación de nitratos y pesticidas.

### 3.3 Potencial redox (Eh) y procesos de oxidación-reducción

El **potencial redox (Eh)** mide la capacidad del suelo para **ceder o aceptar electrones**, expresándose en milivoltios (mV). Representa la condición oxidante o reductora del medio y está estrechamente ligada al contenido de oxígeno y a la actividad microbiana.

- **Suelos oxidantes (Eh > +400 mV):** bien aireados, ricos en oxígeno, donde predominan reacciones de oxidación ( $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+} \rightarrow \text{Mn}^{4+}$ ).
- **Suelos reductores (Eh < 0 mV):** saturados de agua o mal drenados, con predominio de microorganismos anaerobios y reacciones de reducción ( $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{N}_2$ ,  $\text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{S}$ ).

El Eh controla la **movilidad de metales pesados** y nutrientes:

- En condiciones reductoras, elementos como **Fe, Mn, Cu y Zn** se vuelven solubles y potencialmente tóxicos.
- En condiciones oxidantes, tienden a precipitar como óxidos o hidróxidos.

Para la ingeniería ambiental, el Eh es un indicador clave en **procesos de biorremediación, tratamiento de aguas residuales, compostaje y control de drenajes ácidos de mina (DAM)**. Por ejemplo, la restauración de suelos contaminados con arsénico o mercurio requiere controlar tanto el pH como el Eh para inmovilizar los metales en formas insolubles.

### 3.4 Conductividad eléctrica (CE) y salinidad

La **conductividad eléctrica (CE)** mide la capacidad del suelo para conducir corriente eléctrica, directamente relacionada con la **concentración de sales solubles** en la solución del suelo. Se expresa en **dS/m (deciSiemens por metro)**.

- **CE < 2 dS/m:** suelo no salino (óptimo para la mayoría de los cultivos).
- **CE 2–4 dS/m:** suelo moderadamente salino.
- **CE > 4 dS/m:** suelo salino, con riesgo de toxicidad iónica y estrés osmótico.

La salinidad excesiva reduce la **disponibilidad de agua para las plantas**, provoca desequilibrio nutricional y afecta la actividad microbiana. Desde una perspectiva ambiental, los suelos salinos o sódicos pueden alterar ecosistemas acuáticos al generar **escorrentías con alta carga de sales**, especialmente en zonas de riego intensivo o manejo inadecuado de drenajes.

En la costa ecuatoriana, donde la irrigación y la intrusión marina son comunes, la monitorización de CE mediante **sensores IoT o drones multiespectrales** se ha convertido en una herramienta clave para prevenir la salinización progresiva de los suelos agrícolas.

### 3.5 Adsorción y complejación de contaminantes

El suelo actúa como un **reactor químico natural**, donde los contaminantes pueden **adsorberse, precipitar o complejarse** con compuestos minerales y orgánicos, reduciendo su movilidad y toxicidad. Estos procesos dependen de la **composición mineralógica, la materia orgánica, el pH y el potencial redox**.

- **Adsorción:** es la retención de moléculas o iones en la superficie de partículas sólidas. Los coloides de arcilla y los ácidos húmicos poseen cargas negativas que atraen iones metálicos ( $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ).
- **Complejación:** los grupos funcionales ( $-\text{COOH}$ ,  $-\text{OH}$ ,  $-\text{NH}_2$ ) de la materia orgánica forman **complejos estables** con metales y pesticidas, reduciendo su biodisponibilidad.
- **Precipitación:** ocurre cuando las condiciones químicas favorecen la formación de compuestos insolubles, como carbonatos, fosfatos o sulfuros metálicos.

En ingeniería ambiental, estos mecanismos son esenciales para el **diseño de estrategias de remediación**:

- **Biorremediación:** utilización de microorganismos que modifican el pH o Eh, favoreciendo la inmovilización o degradación de contaminantes.
- **Fitorremediación:** empleo de plantas asociadas a microorganismos para extraer o inmovilizar contaminantes.
- **Inmovilización química:** uso de enmiendas (biochar, zeolitas, compost) que incrementan la adsorción y reducen la lixiviación.

En el Ecuador, estudios recientes en zonas agrícolas del Litoral han mostrado que la **adición de biochar derivado de residuos de cacao y banano** incrementa la adsorción de metales pesados y disminuye la movilidad de pesticidas organoclorados hasta en un **40 %**, reforzando el papel del suelo como barrera ambiental natural.

#### 4. Contaminación y procesos de retención en suelos

El suelo actúa como un **sistema reactivo complejo** que puede amortiguar, transformar o inmovilizar contaminantes, desempeñando un papel crucial en la protección de los ecosistemas terrestres y acuáticos. En ingeniería ambiental, comprender los **mecanismos de retención y transporte de contaminantes** es esencial para evaluar riesgos, diseñar estrategias de remediación y garantizar la sostenibilidad de los sistemas productivos.

El comportamiento químico de los contaminantes en el suelo depende de múltiples factores: la textura, el contenido de arcilla y materia orgánica, el pH, el potencial redox, la humedad y la actividad microbiana. Estas propiedades determinan si una sustancia se **adsorbe, degrada o migra** hacia capas más profundas o cuerpos de agua subterráneos.

A continuación, se describen los principales mecanismos y procesos implicados.

##### 4.1 Mecanismos de retención en el suelo

Los suelos poseen una gran capacidad para **retener y transformar contaminantes**, gracias a su composición mineral, su elevada superficie específica y su contenido de materia orgánica y microorganismos. Los tres mecanismos principales son:

##### *a) Adsorción física*

La **adsorción física (fisisorción)** ocurre por fuerzas de Van der Waals entre las moléculas contaminantes y las superficies de los minerales o la materia orgánica del suelo. Este proceso es reversible y depende de la polaridad del contaminante, la temperatura y la humedad. Es importante para

contaminantes orgánicos no polares como hidrocarburos y pesticidas lipofílicos. Los suelos con alta fracción de arcillas finas y humus presentan mayor capacidad de adsorción.

### ***b) Intercambio iónico***

Los **coloides del suelo**, cargados negativamente (arcillas, ácidos húmicos), atraen cationes metálicos como  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  o  $Cu^{2+}$ . Este intercambio ocurre de manera reversible y se ve afectado por la competencia entre iones, el pH y la concentración de sales.

A pH bajos, el aumento de  $H^+$  desplaza a los cationes metálicos adsorbidos, aumentando su movilidad.

A pH neutro o alcalino, los metales se inmovilizan con mayor facilidad.

### ***c) Precipitación química***

Muchos contaminantes metálicos reaccionan con aniones del suelo ( $OH^-$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $PO_4^{3-}$ ,  $S^{2-}$ ) formando **compuestos insolubles**, como hidróxidos, carbonatos, fosfatos o sulfuros metálicos.

Este proceso es común en suelos calizos o con alto contenido de materia orgánica.

Ejemplo: el plomo puede precipitar como  $PbCO_3$  (cerusita) o  $Pb_3(PO_4)_2$  (fosfato de plomo), reduciendo su biodisponibilidad.

### **Síntesis de los mecanismos:**

| MECANISMO             | TIPO DE INTERACCIÓN              | CONTAMINANTES IMPLICADOS          | EFICACIA RELATIVA |
|-----------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| ADSORCIÓN FÍSICA      | Fuerzas de Van der Waals         | Hidrocarburos, pesticidas         | Moderada          |
| INTERCAMBIO IÓNICO    | Enlaces electrostáticos          | Metales pesados (Pb, Cd, Zn)      | Alta              |
| PRECIPITACIÓN QUÍMICA | Reacciones con aniones del suelo | Metales y metaloides (As, Cr, Hg) | Muy alta          |

## **4.2 Comportamiento de metales pesados en el suelo**

Los **metales pesados** representan una de las principales amenazas ambientales debido a su **toxicidad, persistencia y bioacumulación**. Su

comportamiento en el suelo depende de su forma química (especiación), del pH, de la materia orgánica y del Eh (potencial redox).

- **Plomo (Pb):** altamente inmóvil en condiciones neutras o alcalinas; se fija a óxidos de Fe y Mn y a la materia orgánica. Sin embargo, puede movilizarse en suelos ácidos. Afecta el sistema nervioso y la fotosíntesis de las plantas.
- **Cadmio (Cd):** más móvil que el plomo, especialmente en suelos ácidos. Se acumula en tejidos vegetales y animales, generando toxicidad renal y ósea.
- **Cromo (Cr):** presenta dos estados redox:  $\text{Cr}^{3+}$  (poco móvil) y  $\text{Cr}^{6+}$  (altamente tóxico y móvil). La reducción de  $\text{Cr}^{6+}$  a  $\text{Cr}^{3+}$  por materia orgánica o bacterias constituye un proceso clave de detoxificación.
- **Mercurio (Hg):** puede transformarse en metilmercurio ( $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ ) por acción microbiana, una forma altamente tóxica y bioacumulable.
- **Arsénico (As):** presente en formas oxidada ( $\text{As}^{5+}$ ) y reducida ( $\text{As}^{3+}$ ). En suelos reductores, la forma  $\text{As}^{3+}$  es más móvil y tóxica. Los óxidos de Fe y Al actúan como importantes sumideros de arsénico por adsorción.

**Ejemplo ambiental en Ecuador:** En zonas mineras de Portovelo y Zaruma (El Oro), los suelos cercanos a ríos y relaves presentan concentraciones elevadas de Pb y As. Estudios han mostrado que el uso de **biochar de cáscara de cacao** aumenta en un 60 % la retención de estos metales, reduciendo su lixiviación hacia cuerpos de agua.

#### 4.3 Persistencia y degradación de contaminantes orgánicos

Los **contaminantes orgánicos persistentes (COPs)** incluyen pesticidas, hidrocarburos, solventes y compuestos industriales que se acumulan en el suelo durante décadas. Su comportamiento depende de la **adsorción, volatilización, degradación química y biodegradación microbiana**.

- **Pesticidas organoclorados (DDT, lindano):** fuertemente adsorbidos por la materia orgánica, con baja degradabilidad y alta bioacumulación.
- **Herbicidas modernos (glifosato, atrazina):** degradables por microorganismos, aunque su persistencia aumenta en suelos fríos o compactados.
- **Hidrocarburos del petróleo:** los compuestos aromáticos (benceno, tolueno, xileno) son más móviles y tóxicos. Las bacterias hidrocarbonoclasticas (géneros *Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Acinetobacter*) participan en su degradación aeróbica.

La **biodegradación** depende de factores como la aireación, el contenido de nutrientes y la humedad. En condiciones anaerobias o saturadas, los contaminantes tienden a persistir y migrar más fácilmente.

#### 4.4 Transporte y movilidad de contaminantes

El transporte de contaminantes en el suelo está determinado por la percolación del agua, la estructura porosa y las características químicas de las sustancias. Los principales mecanismos son:

- Lixiviación: desplazamiento de contaminantes disueltos con el agua de percolación hacia horizontes más profundos o acuíferos.
- Percolación preferencial: ocurre a través de macroporos o fisuras, donde el flujo es rápido, reduciendo las posibilidades de retención.
- Difusión y dispersión: movimientos de contaminantes por gradientes de concentración.
- Erosión superficial: transporte de partículas contaminadas por escorrentía hacia cuerpos de agua.

La movilidad de los contaminantes se incrementa en suelos arenosos, ácidos o con baja CIC, mientras que los suelos arcillosos y ricos en humus actúan como filtros naturales más eficaces.

#### 4.5 El suelo como barrera natural en vertederos y zonas industriales

El suelo cumple una **función protectora natural** al actuar como **barrera física, química y biológica** frente a la contaminación. En ingeniería ambiental, este principio es la base para el diseño de **rellenos sanitarios, lagunas de oxidación y zonas de confinamiento de residuos peligrosos**.

**Características de un suelo adecuado como barrera:**

- Alta **capacidad de adsorción** (arcillas, materia orgánica).
- Baja **permeabilidad hidráulica** ( $< 10^{-7}$  cm/s).
- Buena **capacidad de intercambio catiónico (CIC)**.
- Presencia de óxidos de Fe y Al que inmovilizan aniones y metaloides.

En el Ecuador, los suelos arcillosos del tipo **vertisol y andosol** se emplean en proyectos de confinamiento de residuos y control de lixiviados. La combinación de propiedades físicas (baja conductividad hidráulica) y químicas (alta CIC y capacidad buffer) convierte a estos suelos en **barreras geoquímicas naturales altamente eficaces**.

**Ejemplo técnico:** En vertederos de Guayaquil y Quito, la aplicación de **capas de arcilla compactada (0.5–1 m)** reduce la migración de metales y compuestos orgánicos hacia el subsuelo en más del 90 %. Adicionalmente, se emplean **sellos geosintéticos y monitoreo piezométrico** para garantizar la contención a largo plazo.

**En síntesis,** la comprensión de los procesos de retención, movilidad y transformación de contaminantes es esencial para la **gestión ambiental del suelo**. Desde la ingeniería ambiental, estas propiedades permiten diseñar estrategias de prevención, tratamiento y recuperación de sitios contaminados, garantizando la protección de los ecosistemas y la salud pública.

## 5. Química del suelo y calidad ambiental

El suelo no solo es un soporte físico para la vegetación, sino un **sistema químico dinámico** que regula los flujos de materia y energía entre la biosfera, la litosfera y la atmósfera. Su composición y sus reacciones determinan la **calidad ambiental**, actuando como filtro, sumidero o fuente de contaminantes. En ingeniería ambiental, el análisis químico del suelo es fundamental para evaluar el impacto de las actividades humanas — agroindustria, minería, urbanización y manejo de residuos— sobre los ecosistemas terrestres.

La **química del suelo** define la capacidad del ecosistema para retener nutrientes, degradar contaminantes, amortiguar cambios de pH y mantener la biodiversidad microbiana. Los parámetros químicos son, por tanto, **indicadores de salud ambiental** que permiten determinar el grado de degradación o contaminación de un sistema edáfico.

### 5.1 Indicadores químicos de contaminación del suelo

Los **indicadores de calidad química del suelo** permiten diagnosticar alteraciones derivadas de la contaminación o del manejo inadecuado. Entre los más importantes destacan:

| INDICADOR                                           | DESCRIPCIÓN Y RELEVANCIA AMBIENTAL                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>PH DEL SUELO</b>                                 | Determina la acidez o alcalinidad del medio. Los suelos ácidos ( $\text{pH} < 5.5$ ) favorecen la solubilización de metales pesados y la toxicidad de $\text{Al}^{3+}$ y $\text{Mn}^{2+}$ ; los alcalinos ( $\text{pH} > 8.0$ ) inducen la precipitación de micronutrientes como Fe, Cu y Zn. |
| <b>CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE)</b>                 | Mide la concentración total de sales solubles (mmhos/cm o dS/m). Valores $> 4$ dS/m indican salinidad alta, lo que afecta la germinación, la absorción de agua y el equilibrio osmótico de las plantas.                                                                                       |
| <b>CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO (CIC)</b>     | Representa la cantidad de cationes que el suelo puede retener e intercambiar (cmol(+)/kg). Una CIC elevada ( $> 20$ cmol(+)/kg) implica buena fertilidad y capacidad de adsorción de contaminantes metálicos.                                                                                 |
| <b>CARBONO ORGÁNICO TOTAL (COT)</b>                 | Refleja el contenido de materia orgánica y su capacidad para retener nutrientes y mejorar la estructura. Disminuciones de COT indican degradación o erosión del suelo.                                                                                                                        |
| <b>METALES PESADOS (PB, CD, CR, NI, CU, ZN, AS)</b> | Indicadores directos de contaminación industrial o minera. Su acumulación afecta la microbiota, la fertilidad y la inocuidad alimentaria.                                                                                                                                                     |
| <b>RELACIÓN C/N</b>                                 | Índice de equilibrio biogeoquímico. Valores bajos ( $< 10$ ) reflejan mineralización rápida; valores altos ( $> 20$ ) indican acumulación de residuos no descompuestos.                                                                                                                       |

#### **Interpretación aplicada:**

En suelos agrícolas del litoral ecuatoriano, CE superiores a 3,5 dS/m y pH mayores de 8.0 se asocian con salinización secundaria por riego con aguas ricas en sodio, reduciendo el rendimiento de banano y arroz. En cambio, en suelos volcánicos andinos, el COT puede superar el 10 %, confiriendo alta capacidad buffer y resistencia a la acidificación.

## 5.2 Interacciones suelo-agua-atmósfera

El suelo constituye un **nexo químico y energético** entre el agua y la atmósfera, mediando procesos esenciales como el ciclo de nutrientes, la filtración de contaminantes y la regulación de gases de efecto invernadero. Estas interacciones definen su papel en el **cambio climático y la sostenibilidad ambiental**.

### Flujos de nutrientes:

Los suelos actúan como reservorios temporales de nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S). La lixiviación de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) o fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) hacia cuerpos de agua causa eutrofización, afectando la calidad hídrica y la biodiversidad acuática.

### Emisiones de gases de efecto invernadero:

- **Óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ):** generado por desnitrificación microbiana en suelos saturados o con exceso de nitrógeno; su potencial de calentamiento global es 298 veces mayor que el del  $\text{CO}_2$ .
- **Metano ( $\text{CH}_4$ ):** emitido por bacterias metanogénicas en suelos anaerobios, especialmente en arrozales inundados y humedales.
- **Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ):** liberado durante la respiración microbiana y la descomposición de materia orgánica. El balance entre estos gases depende del manejo agrícola y de la química del suelo (pH, Eh, materia orgánica).

### Ciclos hidrológicos y geoquímicos:

La calidad química del suelo influye en la **recarga y depuración natural de los acuíferos**. Los suelos con buena capacidad de adsorción eliminan nitratos, fosfatos y metales, mientras que los degradados o arenosos favorecen la contaminación subterránea.

## 5.3 Impacto de la acidificación y salinización

### a) Acidificación del suelo

Resulta de la aplicación excesiva de fertilizantes nitrogenados, la lluvia ácida o la degradación orgánica. A nivel químico, aumenta la solubilidad de metales pesados y reduce la disponibilidad de nutrientes básicos ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ).

- En Ecuador, los suelos de la Sierra central muestran  $\text{pH} < 5.5$  por fertilización intensiva en hortalizas y flores, lo que ha requerido encalado periódico con carbonato de calcio para restablecer la capacidad buffer.

### **b) Salinización y sodificación**

Se produce por acumulación de sales solubles o por exceso de sodio intercambiable ( $\text{Na}^+$ ). Químicamente, el  $\text{Na}^+$  reemplaza  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  en el complejo de cambio, dispersando las arcillas y reduciendo la permeabilidad.

En la Costa ecuatoriana, la irrigación con aguas del río Daule ha incrementado la CE y el índice de sodio de adsorción (SAR), afectando los cultivos de arroz y banano.

Las prácticas de **lavado controlado y aplicación de yeso agrícola ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )** permiten recuperar la estructura del suelo al reemplazar  $\text{Na}^+$  por  $\text{Ca}^{2+}$ .

### **5.4 Procesos de inmovilización y biodisponibilidad de contaminantes**

El comportamiento químico de los contaminantes en el suelo depende de su **biodisponibilidad**, es decir, de la fracción que puede ser absorbida por los organismos o lixiviada hacia el agua. Esta biodisponibilidad está regulada por procesos químicos de **inmovilización**, que reducen la toxicidad y la movilidad de los contaminantes:

- **Adsorción y complejación:** Los grupos funcionales de la materia orgánica ( $-\text{COOH}$ ,  $-\text{OH}$ ,  $-\text{NH}_2$ ) y los minerales de Fe y Al forman complejos estables con metales pesados. Esto reduce su solubilidad y disponibilidad biológica.
- **Precipitación química:** Metales como Pb y Zn forman carbonatos o fosfatos insolubles, mientras que As y Cr pueden co-precipitar con óxidos de Fe, inmovilizándose en condiciones oxidantes.
- **Reducción-oxidación (redox):** En ambientes anóxicos,  $\text{Cr}^{6+}$  se reduce a  $\text{Cr}^{3+}$  (menos móvil), mientras que  $\text{As}^{5+}$  se reduce a  $\text{As}^{3+}$  (más tóxico). Controlar el Eh permite gestionar el destino de los contaminantes.
- **Bioinmovilización microbiana:** Ciertas bacterias y hongos transforman los contaminantes mediante biosorción o bioprecipitación, incorporándolos a su biomasa o al humus.

**Ejemplo aplicado:** En suelos contaminados por minería aurífera en el sur del Ecuador, el empleo de **biochar** enriquecido con microorganismos metalotolerantes (*Bacillus subtilis* y *Aspergillus niger*) ha demostrado reducir la biodisponibilidad de Cd y Pb en más del 70 %, mejorando la calidad del suelo y disminuyendo la transferencia de metales a los cultivos.

## 5.5 Relevancia ambiental e ingenieril

- Desde la perspectiva de la **ingeniería ambiental**, la química del suelo proporciona herramientas cuantitativas para la **evaluación, prevención y remediación de la contaminación**.
- Permite establecer **límites máximos permisibles** de contaminantes según estándares internacionales (FAO, EPA, OMS).
- Facilita el diseño de **barreras geoquímicas**, sistemas de fitorremediación y técnicas de recuperación de suelos degradados.
- Contribuye al monitoreo de la **salud de los ecosistemas terrestres**, integrando indicadores físicos, químicos y biológicos en sistemas de información ambiental.

En síntesis, comprender las **reacciones químicas y geoquímicas del suelo** permite abordar de manera integral los desafíos contemporáneos de sostenibilidad, cambio climático y gestión ambiental, asegurando la preservación de los recursos edáficos como patrimonio natural y productivo de las generaciones futuras.

## 6. Técnicas analíticas y monitoreo químico del suelo

El estudio químico del suelo requiere una metodología rigurosa que garantice la **representatividad, precisión y trazabilidad** de los resultados. En ingeniería ambiental, la caracterización analítica del suelo no solo busca evaluar su fertilidad agrícola, sino también su **calidad ambiental**, identificando la presencia de contaminantes, metales pesados, hidrocarburos o exceso de sales. Este apartado desarrolla los principales procedimientos y técnicas utilizadas para el **muestreo, análisis y monitoreo químico** de los suelos, así como los estándares normativos que rigen dichos procesos.

### 6.1 Muestreo y conservación de muestras edáficas

El **muestreo** es la etapa más crítica del proceso analítico, ya que determina la validez de los resultados obtenidos en laboratorio. Un análisis químico solo es tan confiable como lo sea la muestra que lo representa.

#### *a) Estrategias de muestreo:*

- **Aleatorio simple:** útil en áreas homogéneas; las muestras se distribuyen al azar dentro del lote.
- **Sistemático o en cuadrícula:** empleado en cartografía de fertilidad y monitoreo ambiental; permite análisis geoespacial.

- **Dirigido o selectivo:** se aplica en zonas con sospecha de contaminación puntual (vertederos, áreas mineras, zonas industriales).

***b) Profundidad de muestreo:***

- **Capa superficial (0–20 cm):** zona más activa biológicamente, relevante para estudios agrícolas.
- **Horizontes subsuperficiales (20–60 cm):** empleados en estudios de lixiviación y transporte de contaminantes.
- **Perfiles profundos (>60 cm):** importantes en evaluación de barreras naturales o monitoreo de infiltración de lixiviados.

***c) Manipulación y preservación:***

- Las muestras deben colocarse en **recipientes limpios e inertes** (vidrio o polietileno de alta densidad).
- Se deben **rotular con código, coordenadas y profundidad**.
- Evitar contaminación cruzada: utilizar herramientas de acero inoxidable o teflón, y desinfectarlas entre sitios.
- Para análisis de metales pesados, secar las muestras a 40 °C; para determinaciones biológicas o redox, mantenerlas refrigeradas a 4 °C.
- El tiempo máximo de almacenamiento previo al análisis no debe superar los **14 días**.

## **6.2 Métodos instrumentales de análisis químico**

El desarrollo tecnológico ha permitido la adopción de instrumentos cada vez más sensibles y precisos en el análisis de suelos. A continuación, se presentan las técnicas más relevantes:

| <b>Técnica</b>                                                           | <b>Principio de funcionamiento</b>                                                     | <b>Aplicación en análisis de suelos</b>                                                                |
|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Espectrofotometría UV-Vis</b>                                         | Medición de la absorbancia de luz en el rango ultravioleta-visible.                    | Determinación de nitratos, fosfatos, sulfatos y materia orgánica disuelta.                             |
| <b>Absorción atómica (AAS)</b>                                           | Atomización de la muestra y cuantificación de metales según la absorción de radiación. | Cuantificación de metales pesados (Pb, Cd, Zn, Cu, Fe, Mn, Ni).                                        |
| <b>Espectrometría de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES/ICP-MS)</b> | Ionización por plasma y detección multielemental de alta precisión.                    | Determinación simultánea de elementos traza y macroelementos con sensibilidad ppm–ppb.                 |
| <b>Cromatografía iónica (IC)</b>                                         | Separación de aniones y cationes por resinas de intercambio.                           | Análisis de nitratos, cloruros, sulfatos y amonio.                                                     |
| <b>Cromatografía de gases (GC) y GC-MS</b>                               | Separación y detección de compuestos volátiles y semivolátiles.                        | Identificación de pesticidas, hidrocarburos aromáticos y contaminantes orgánicos persistentes (COPs).  |
| <b>Potenciometría y electrodos selectivos</b>                            | Medición directa de potencial eléctrico.                                               | Determinación de pH, conductividad eléctrica (CE), potencial redox (Eh) y actividad iónica específica. |
| <b>Fluorescencia de rayos X (XRF)</b>                                    | Emisión de radiación característica de cada elemento.                                  | Evaluación rápida de composición elemental in situ.                                                    |

**Aplicaciones en Ecuador:** Laboratorios de referencia como el **INAMHI**, **INER** y **ESPOL** han incorporado espectrometría de plasma (ICP-OES) para el monitoreo de suelos agrícolas y contaminados, mientras que las universidades técnicas regionales emplean **XRF portátil** para diagnósticos rápidos de metales en proyectos de remediación minera.

### 6.3 Análisis de fertilidad vs. análisis ambiental

Aunque ambos tipos de análisis se basan en técnicas similares, difieren en su enfoque, objetivos y parámetros evaluados.

| ASPECTO                   | ANÁLISIS DE FERTILIDAD                                      | ANÁLISIS AMBIENTAL                                                         |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| OBJETIVO PRINCIPAL        | Evaluar la disponibilidad de nutrientes para cultivos.      | Detectar contaminantes y evaluar riesgos ecológicos.                       |
| PARÁMETROS MEDIDOS        | pH, materia orgánica, N, P, K, Ca, Mg, micronutrientes.     | Metales pesados, hidrocarburos, pesticidas, CE, potencial redox.           |
| METODOLOGÍA DE EXTRACCIÓN | Soluciones neutras o ligeramente ácidas (Mehlich-3, Olsen). | Digestión ácida fuerte (HNO <sub>3</sub> –HCl–HF) según EPA 3050B o 3051A. |
| UNIDAD DE REPORTE         | mg/kg o ppm de nutrientes disponibles.                      | mg/kg de contaminantes totales o biodisponibles.                           |
| FRECUENCIA                | Estacional o anual.                                         | Según plan de monitoreo o contingencias ambientales.                       |
| INTERPRETACIÓN            | Guías agronómicas (rendimiento óptimo).                     | Normas de calidad del suelo (riesgo ambiental o toxicidad).                |

#### Ejemplo:

En la provincia de Azuay, los suelos agrícolas de Cuenca presentan altos niveles naturales de Fe y Al que no afectan la fertilidad, pero en zonas

mineras cercanas los mismos metales exceden límites ambientales establecidos por la EPA, evidenciando la necesidad de enfoques analíticos diferenciados.

#### 6.4 Protocolos y normativas internacionales

El monitoreo químico del suelo debe basarse en procedimientos normalizados que aseguren la comparabilidad de resultados entre laboratorios y países. Entre los más reconocidos se encuentran:

- **ISO 11074:2015 – Suelos: Principios de muestreo y preparación.** Define los criterios para la selección de sitios y profundidades.
- **EPA 3050B / 3051A – Métodos de digestión ácida para metales pesados.** Utilizados en la cuantificación de elementos traza mediante AAS o ICP.
- **ISO 11466:1995 – Extracción de elementos traza solubles en agua regia.** Establece los procedimientos de digestión para matrices minerales complejas.
- **INEN 2169:2018 – Calidad del suelo. Determinación de pH y conductividad eléctrica.** Norma ecuatoriana aplicable en estudios de fertilidad y contaminación.

**FAO (2017) – Manual de procedimientos para la evaluación de la salud del suelo.**

Recomendado para estudios integrales de calidad edáfica y sostenibilidad.

#### Control de calidad y aseguramiento analítico (QA/QC):

- Uso de **materiales de referencia certificados (CRM).**
- Análisis duplicados y blancos para verificar exactitud y precisión.
- Trazabilidad de calibraciones instrumentales.
- Auditorías interlaboratorios para validar resultados.

#### 6.5 Importancia del monitoreo continuo

El monitoreo químico no debe concebirse como una acción puntual, sino como un proceso **sistemático y dinámico** dentro de la gestión ambiental y la planificación territorial. Los **programas de vigilancia edáfica** permiten:

- Detectar tendencias de **degradación química** (acidificación, salinización, contaminación).
- Evaluar la **efectividad de medidas de remediación o restauración.**
- Generar **modelos predictivos de riesgo ambiental** mediante inteligencia artificial y bases de datos geoespaciales.

En Ecuador, la implementación de **redes nacionales de monitoreo de suelos** —impulsadas por el MAG y la SENESCYT— permitirá integrar la información química con datos de biodiversidad, clima y uso del territorio, aportando una base científica sólida para políticas de **agricultura sostenible y gestión ambiental**.

## 7. Remediación química y biogeoquímica del suelo

La remediación de suelos constituye uno de los ejes más relevantes de la ingeniería ambiental contemporánea, orientada a **restaurar la funcionalidad ecológica, química y biológica** de los ecosistemas degradados por actividades agrícolas intensivas, mineras, industriales o urbanas. Desde una perspectiva química, los procesos de remediación se basan en la **neutralización, inmovilización o transformación de contaminantes**, mientras que, desde el punto de vista biogeoquímico, se busca reactivar las interacciones naturales entre microorganismos, materia orgánica y minerales del suelo para **devolver su equilibrio dinámico**.

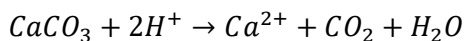
### 7.1 Neutralización de suelos ácidos y alcalinos

El **pH del suelo** es un parámetro crítico que condiciona la disponibilidad de nutrientes y la movilidad de contaminantes. Los procesos de **neutralización** buscan ajustar este equilibrio mediante la adición controlada de agentes correctores:

- **Suelos ácidos (pH < 5.5):**

Se corrigen aplicando **enmiendas calcáreas** ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaO}$  o dolomita), que neutralizan los iones  $\text{H}^+$  y  $\text{Al}^{3+}$  en el complejo de intercambio.

La reacción general puede expresarse como:

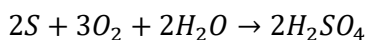


En suelos tropicales del Ecuador, la encalación es esencial para mejorar la disponibilidad de fósforo y reducir la toxicidad por aluminio.

- **Suelos alcalinos (pH > 8):**

Se tratan mediante **acidificación controlada** con azufre elemental, sulfato ferroso o ácido cítrico.

El azufre elemental se oxida por acción microbiana (*Thiobacillus* spp.), produciendo ácido sulfúrico:



Este proceso reduce el pH y libera micronutrientes inmovilizados.

La neutralización adecuada contribuye a estabilizar contaminantes metálicos y a optimizar la actividad microbiana, favoreciendo los procesos de **autodepuración natural del suelo**.

## 7.2 Fitorremediación, biosorción y enmiendas naturales

La **fitorremediación** utiliza plantas con alta capacidad de absorción, acumulación o transformación de contaminantes. Este enfoque es ambientalmente limpio, de bajo costo y complementario a las técnicas químicas tradicionales.

### Tipos de fitorremediación:

- **Fitoextracción:** las plantas absorben metales (Pb, Cd, Zn) y los concentran en tejidos aéreos (ej. *Brassica juncea*, *Helianthus annuus*).
- **Fitoestabilización:** especies como *Vetiveria zizanioides* inmovilizan contaminantes en la rizosfera mediante exudados y formación de complejos.
- **Fitodegradación:** plantas y sus enzimas degradan contaminantes orgánicos (plaguicidas, hidrocarburos).
- **Biosorción microbiana:** Microorganismos como *Pseudomonas*, *Bacillus* y *Aspergillus niger* pueden retener metales pesados mediante adsorción superficial en sus paredes celulares ricas en grupos carboxilos, aminos y fosfatos.

### Uso de enmiendas naturales:

Biochar: material carbonoso obtenido por pirólisis de biomasa; posee alta capacidad de adsorción y mejora la capacidad de intercambio catiónico.

Zeolitas naturales: aluminosilicatos microporosos que retienen amonio, metales y compuestos orgánicos volátiles.

Compost y humus: incrementan la materia orgánica y fomentan la formación de complejos estables con metales pesados.

Cal agrícola y yeso: reducen toxicidad por aluminio y sodio, respectivamente.

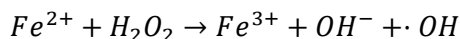
Ejemplo aplicado:  
En la cuenca del río Portoviejo, la aplicación de biochar de cascarilla de arroz (10 t/ha) redujo la movilidad de Cd y Pb en un 35 % y mejoró el pH del suelo en 0,6 unidades tras seis meses, evidenciando el potencial de las enmiendas locales para la restauración ambiental.

### 7.3 Tecnologías de oxidación avanzada (AOPs)

Las **tecnologías de oxidación avanzada (Advanced Oxidation Processes, AOPs)** se aplican en suelos contaminados con compuestos orgánicos persistentes (COPs), como hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), pesticidas o fenoles. Su principio consiste en la generación de **radicales hidroxilos ( $\bullet\text{OH}$ )** con alto poder oxidante, capaces de mineralizar los contaminantes en  $\text{CO}_2$  y agua.

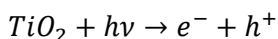
#### Principales métodos:

- **Reacción de Fenton ( $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ ):**



Eficaz en suelos con pH ácido (2.5–4.0), aunque requiere estabilización del hierro para evitar precipitación.

- **Fotocatálisis heterogénea ( $\text{TiO}_2/\text{UV}$ ):** La radiación UV excita el  $\text{TiO}_2$ , generando electrones y huecos que promueven reacciones redox:



Los huecos oxidan agua y generan  $\bullet\text{OH}$ , degradando contaminantes orgánicos.

- **Ozonización catalítica ( $\text{O}_3 + \text{cat.}$ ):** Utiliza ozono gaseoso en combinación con catalizadores metálicos o carbón activado para oxidar contaminantes volátiles o semivolátiles.

Estas técnicas se integran en la **remediación química asistida**, combinando la acción de oxidantes con procesos biológicos (bioaumentación), permitiendo la degradación completa de moléculas complejas.

### 7.4 Sinergia entre procesos químicos y biológicos en la descontaminación

Los enfoques modernos de **biorremediación integrada** buscan aprovechar la **complementariedad entre procesos químicos y biológicos**, generando sistemas híbridos más eficientes y sostenibles.

- **Quimiorremediación asistida por bioestimulación:** Se aplican oxidantes suaves o agentes complejantes (ácidos orgánicos, peróxido de calcio) para aumentar la biodisponibilidad de contaminantes, favoreciendo la degradación microbiana.
- **Bioaumentación tras oxidación parcial:** Los contaminantes orgánicos parcialmente oxidados por Fenton o  $\text{TiO}_2$  se transforman

en compuestos más biodegradables, facilitando su consumo por bacterias degradadoras.

- **Procesos secuenciales químico–biológicos:** En suelos con mezcla de metales y compuestos orgánicos, se emplea primero un tratamiento químico (inmovilización o oxidación) y luego un tratamiento biológico de estabilización.

**Ejemplo experimental:** En un suelo contaminado con diésel en Santo Domingo de los Tsáchilas, un tratamiento combinado de **ozonización y bioaugmentación con *Pseudomonas putida*** logró una reducción del 85 % en hidrocarburos totales en 30 días, frente al 50 % obtenido con tratamiento biológico solo.

## 7.5 Perspectivas y desafíos

La remediación química y biogeoquímica del suelo representa un campo estratégico para la **ingeniería ambiental ecuatoriana**, en especial ante el incremento de pasivos mineros, lixiviados urbanos y contaminación agrícola. Entre los principales desafíos destacan:

- La **carencia de normativas nacionales específicas** para límites de contaminantes en suelos agrícolas e industriales.
- La **limitada infraestructura analítica** para monitoreo continuo y validación de tratamientos.
- La **necesidad de tecnologías de bajo costo** adaptadas a condiciones tropicales.
- El desarrollo de **modelos integrados de simulación** que consideren los procesos fisicoquímicos y biológicos en conjunto.

La consolidación de una **estrategia nacional de remediación sostenible** debe basarse en tres pilares:

- Investigación interdisciplinaria (química, biología, geotecnia y agronomía).
- Transferencia tecnológica local.
- Participación comunitaria en la gestión ambiental.

Solo mediante esta visión integrada será posible recuperar los suelos degradados y fortalecer la **resiliencia ambiental y productiva** del territorio ecuatoriano.

## 8. Aplicaciones ambientales y casos de estudio

La aplicación de los principios de la **química de suelos en la ingeniería ambiental** permite desarrollar soluciones efectivas y sostenibles frente a problemáticas asociadas a la contaminación, degradación y pérdida de funcionalidad de los ecosistemas terrestres. En Ecuador, donde la diversidad geológica y edáfica se combina con actividades extractivas, agroindustriales y urbanas de creciente intensidad, la **química del suelo** constituye una herramienta técnica esencial para la **evaluación, tratamiento y restauración ambiental**.

### 8.1 Tratamiento de efluentes y retención de contaminantes en filtros de suelo

El suelo puede funcionar como un **biofiltro natural**, aprovechando sus propiedades fisicoquímicas —adsorción, intercambio iónico, precipitación y degradación microbiana— para el tratamiento de efluentes domésticos, industriales y agropecuarios.

**Principios químicos del tratamiento:**

- Los **coloides arcillosos** y la **materia orgánica** poseen cargas negativas que adsorben cationes metálicos ( $Pb^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ) mediante procesos de **intercambio catiónico**.
- Los **óxidos de hierro y aluminio** fijan aniones como fosfatos y arseniatos por **complejación superficial**.
- Los **microorganismos edáficos** degradan compuestos orgánicos (urea, detergentes, hidrocarburos) mediante oxidación biológica.

**Filtros de suelo y humedales artificiales:**

- En zonas rurales ecuatorianas, los **sistemas de infiltración percolante y humedales construidos** son una alternativa de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Los suelos arenosos o franco-arenosos con buena aireación facilitan la **nitrificación y oxidación del carbono**, mientras que los suelos arcillosos retienen metales y fósforo.

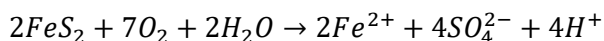
**Ejemplo técnico:** En la parroquia Río Chico (Manabí), un sistema de **filtro de suelo de 60 cm de profundidad** con capas de grava, arena y suelo franco-limoso logró una **reducción del 82 % en  $DBO_5$  y del 65 %** en fosfatos, cumpliendo estándares de descarga ambiental (INEN 1108).

## 8.2 Gestión de residuos mineros y lixiviados

La minería metálica y no metálica genera residuos con alto potencial de **contaminación ácida y metálica**. El conocimiento químico del suelo permite diseñar **barreras reactivas** y estrategias de **inmovilización de metales**.

**Procesos involucrados:**

- **Oxidación de sulfuros metálicos** (pirita, calcopirita), generando drenaje ácido de mina (DAM):



- La acidez resultante disuelve metales pesados (Cu, Zn, Pb), que pueden migrar hacia aguas subterráneas.
- Los suelos arcillosos y ricos en materia orgánica actúan como **sumideros naturales**, favoreciendo la **precipitación de hidróxidos metálicos** y su **inmovilización**.

**Gestión química de lixiviados:**

- **Neutralización:** uso de cal o dolomita para elevar el pH y precipitar metales.
- **Sorbentes naturales:** zeolitas, bentonitas y biochar para retención de cationes metálicos.
- **Biorreactores anaerobios:** promueven la reducción de sulfatos y la precipitación de metales como sulfuros insolubles.

**Caso ecuatoriano:** En Portovelo-Zaruma (El Oro), estudios de la Universidad Técnica Particular de Loja demostraron que la mezcla de **biochar de bagazo de caña (5 %)** y **cal agrícola (2 t/ha)** redujo la concentración de Cu y Zn solubles en lixiviados mineros en un 60 %, estabilizando el pH en torno a 7.2.

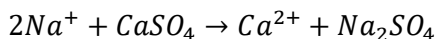
## 8.3 Recuperación de suelos salinos y contaminados por hidrocarburos

Los **suelos salinizados** y los **contaminados con hidrocarburos** constituyen dos de las formas más severas de degradación química, especialmente en regiones costeras y amazónicas del Ecuador.

**Suelos salinos y sódicos:**

- Presentan alta conductividad eléctrica ( $> 4 \text{ dS/m}$ ) y predominio de  $Na^+$ , lo que afecta la estructura del suelo y la absorción de agua por las plantas.

- El tratamiento consiste en la **aplicación de yeso agrícola ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )**, que intercambia  $\text{Ca}^{2+}$  por  $\text{Na}^+$  en el complejo de intercambio:



- El  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  formado se elimina mediante **lavado controlado con agua de buena calidad**, restableciendo la permeabilidad.
- Complementariamente, la adición de **materia orgánica y biochar** mejora la agregación y la retención hídrica.

#### **Suelos contaminados con hidrocarburos:**

- La remediación combina procesos **fisicoquímicos** (oxidación, adsorción) y **biológicos** (biorremediación).
- En suelos arcillosos, la baja aireación limita la degradación, por lo que se aplican **biosurfactantes** y aireación asistida.
- En zonas de Esmeraldas y Lago Agrio, la aplicación de **compost enriquecido con *Trichoderma harzianum* y *Pseudomonas fluorescens*** aceleró la degradación de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en un 70–85 % en 90 días.

**Estudio de campo:** En Lago Agrio (Sucumbíos), un ensayo del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP, 2023) mostró que la combinación de **biochar de coco + microorganismos degradadores** logró disminuir los TPH de 6.500 mg/kg a menos de 1.000 mg/kg, restaurando la cobertura vegetal en seis meses.

### **8.4 Experiencias ecuatorianas en monitoreo y restauración de suelos agrícolas**

En Ecuador, las universidades y entidades públicas han impulsado programas de **monitoreo químico de suelos** con enfoque ambiental y productivo, contribuyendo a la sostenibilidad agroecológica.

- **Monitoreo de metales pesados:** En zonas agrícolas de Manabí y Los Ríos se han detectado niveles de Cd y Pb superiores a 1.5 mg/kg, asociados al uso de fertilizantes fosfatados. El monitoreo sistemático permite diseñar estrategias de rotación de cultivos y selección de fuentes menos contaminadas.
- **Restauración mediante enmiendas locales:** Uso de **biochar de residuos agroindustriales (banano, cacao, palma africana)** para adsorber metales y mejorar la CIC.

- Incorporación de **abonos orgánicos compostados** con microorganismos eficientes (EM) para recuperar suelos degradados.

En el cantón Jipijapa, la aplicación de **compost-biochar** en suelos degradados por sobrepastoreo aumentó el contenido de carbono orgánico en 0.8 % y mejoró la capacidad de campo en 18 %.

#### **Proyectos destacados:**

- *Proyecto Suelos Limpios* (ESPOL, 2021): restauración de suelos agrícolas del Guayas mediante enmiendas naturales y monitoreo de plaguicidas residuales.
- *Programa de Recuperación de Pasivos Ambientales* (MAATE, 2020): diagnóstico químico y rehabilitación de suelos contaminados por minería artesanal en Loja y Zamora Chinchipe.

### **8.5 Conclusiones y perspectivas**

La aplicación de la **química de suelos en la ingeniería ambiental** constituye un pilar fundamental para la transición hacia modelos de producción sostenibles en el Ecuador. A través de la comprensión de los procesos de **adsorción, intercambio, oxidación y complejación**, es posible diseñar estrategias efectivas para **prevenir, mitigar y remediar la contaminación del suelo**.

La tendencia actual apunta hacia el **uso combinado de tecnologías químicas, biológicas y digitales**, donde los sensores de calidad del suelo, la teledetección y la inteligencia artificial permiten monitorear y optimizar la recuperación en tiempo real. En este contexto, el suelo deja de ser un simple soporte físico y se reconoce como **un sistema químico vivo, resiliente y esencial para la sostenibilidad ambiental y la seguridad alimentaria nacional**.

## **9. Integración profesional: química del suelo en la Ingeniería Ambiental**

La **química del suelo** constituye una herramienta central en la formación y práctica del **ingeniero ambiental**, al proporcionar las bases científicas necesarias para comprender, diagnosticar y restaurar los sistemas terrestres afectados por actividades antrópicas. En esta disciplina convergen los principios de la química, la geología, la biología y la ingeniería, orientados hacia la **gestión sostenible del territorio y la mitigación de impactos ambientales**.

El conocimiento químico del suelo no se limita al análisis de su fertilidad agrícola, sino que se extiende a campos estratégicos como la **evaluación de contaminación, el diseño de tecnologías de remediación, el monitoreo ambiental y la planificación territorial sostenible.**

### 9.1 Competencias ambientales vinculadas

El profesional en Ingeniería Ambiental que domina la química de suelos desarrolla competencias técnicas y analíticas altamente valoradas en los sectores público y privado, entre ellas:

- **Diagnóstico químico y monitoreo ambiental:** Capacidad para diseñar planes de muestreo, realizar análisis de laboratorio y evaluar indicadores de calidad edáfica (pH, CE, CIC, metales pesados, materia orgánica).  
Uso de normas internacionales (ISO 18400, EPA 3050B, INEN 2600) para garantizar la calidad de los resultados.
- **Modelación de procesos edáficos:** Aplicación de modelos de transporte y adsorción de contaminantes (como HYDRUS, Visual MODFLOW, PHREEQC) para predecir el comportamiento químico de iones y compuestos en el perfil del suelo. Integración de datos climáticos, hidrológicos y geoquímicos para la toma de decisiones ambientales.
- **Gestión y restauración de suelos degradados:** Diseño de estrategias de remediación mediante el uso de enmiendas, fitotecnologías, biochar o sistemas de tratamiento in situ. Evaluación del impacto ambiental de proyectos industriales o agropecuarios sobre los recursos edáficos y hídricos.
- **Innovación y sostenibilidad:** Incorporación de tecnologías limpias y economía circular en la gestión de residuos sólidos, aguas residuales y suelos contaminados. Desarrollo de propuestas integradas de mitigación de gases de efecto invernadero desde la gestión del carbono en el suelo.

### 9.2 Ejemplos de proyectos interdisciplinarios

La aplicación de la química del suelo en la Ingeniería Ambiental se manifiesta en diversos tipos de proyectos que integran investigación, gestión y tecnología aplicada:

#### Suelos industriales y control de pasivos ambientales:

- Evaluación de contaminación por hidrocarburos, metales pesados o lixiviados industriales.

- Aplicación de modelos de retención y movilidad iónica para diseñar barreras reactivas naturales o artificiales.
- Ejemplo: *Proyecto de recuperación de suelos contaminados por plomo en la zona industrial de Durán (Guayas)*, donde se aplicaron enmiendas con fosfatos y biochar logrando reducir la biodisponibilidad de Pb en un 65 %.

#### **Agricultura sostenible y química de suelos:**

- Diseño de estrategias de fertilización racional basadas en análisis químico integral (CIC, pH, micronutrientes, carbono orgánico).
- Integración de indicadores de calidad química con parámetros biológicos (respiración basal, biomasa microbiana).
- Ejemplo: *Proyecto “Suelos Vivos” (Manabí)*, donde la aplicación de compost y biofertilizantes redujo en 40 % el uso de fertilizantes sintéticos, mejorando la retención de nutrientes y el balance de carbono.

#### **Humedales artificiales y tratamiento de efluentes:**

- Empleo del suelo como medio filtrante en sistemas de tratamiento natural.
- Evaluación del potencial de adsorción y precipitación de contaminantes (N, P, Cu, Zn) según la mineralogía y composición química del medio.
- Ejemplo: *Sistema de humedal artificial en la parroquia San Joaquín (Cuenca)*, diseñado con suelo franco-limoso y grava local, logró remover el 85 % de nitratos y el 70 % de fosfatos en aguas residuales domésticas.
- Estos casos demuestran que el ingeniero ambiental no solo aplica principios químicos, sino que integra análisis físico, biológico y social para alcanzar soluciones ambientalmente sostenibles y económicamente viables.

### **9.3 Rol del ingeniero ambiental en la gestión edáfica sostenible**

El ingeniero ambiental desempeña un rol estratégico en la **gestión integral del suelo** como recurso natural no renovable y eje de la sostenibilidad territorial. Su función abarca desde la planificación y prevención hasta la restauración y monitoreo posintervención.

- **Gestión preventiva:** Identificación de zonas vulnerables mediante mapas de riesgo químico y capacidad de uso del suelo. Diseño de

prácticas de conservación (labranza mínima, cobertura vegetal, terrazas, bioenmiendas).

- **Gestión correctiva y restaurativa:** Implementación de planes de remediación para suelos contaminados, combinando procesos fisicoquímicos y biológicos. Evaluación de la eficacia de las intervenciones mediante indicadores de calidad edáfica (CE, C/N, carbono orgánico, glomalina).
- **Gestión adaptativa y tecnológica:** Uso de sensores de pH, humedad y salinidad conectados a plataformas IoT para monitorear en tiempo real la calidad del suelo. Integración de sistemas SIG, drones y modelación 3D para la toma de decisiones territoriales basadas en datos.
- **Responsabilidad ética y social:** Garantizar la protección del suelo como patrimonio ambiental y sustento de la seguridad alimentaria. Promover la participación comunitaria y la educación ambiental en torno al uso sostenible del recurso edáfico.

#### 9.4 Reflexión final: hacia una práctica ambiental integrada

La **química del suelo**, aplicada desde la ingeniería ambiental, se consolida como un pilar de la **bioeconomía y la sostenibilidad territorial**. El ingeniero ambiental contemporáneo debe ser capaz de comprender el suelo como un sistema reactivo, dinámico y multifuncional, donde la química, la microbiología y la hidrología convergen para garantizar la estabilidad ecológica.

De esta manera, la **gestión edáfica sostenible** no solo representa una obligación técnica, sino una **responsabilidad ambiental y ética**, esencial para enfrentar los desafíos del cambio climático, la degradación de los ecosistemas y la transición hacia una producción verde.

### 10. Conclusiones y desafíos

La **química de suelos aplicada a la ingeniería ambiental** constituye un eje transversal en la transición hacia modelos de producción y gestión territorial sostenibles. Su comprensión profunda permite integrar procesos fisicoquímicos, biogeoquímicos y ecológicos para mantener la funcionalidad del suelo como soporte de la vida, medio de depuración natural y reservorio de carbono.

En este contexto, la **resiliencia ecológica** de los sistemas terrestres depende en gran medida de la estabilidad química del suelo. El control del pH, la capacidad de intercambio catiónico, la materia orgánica y los procesos redox no solo determinan la fertilidad agrícola, sino también la capacidad del suelo

para **retener contaminantes, amortiguar perturbaciones climáticas y regenerarse naturalmente**. La gestión química del suelo, por tanto, se convierte en una herramienta estratégica frente a la degradación, la desertificación y la pérdida de biodiversidad.

### **10.1 Hacia una química de suelos orientada a la resiliencia ecológica**

El enfoque contemporáneo de la química de suelos debe trascender el análisis tradicional de laboratorio para incorporar una visión **sistémica e integradora**, donde los procesos de adsorción, precipitación, oxidación y complejación se vinculen con la dinámica ecológica del paisaje. La resiliencia de un ecosistema depende de su capacidad para **mantener la homeostasis química** ante presiones externas como el uso intensivo de agroquímicos, la contaminación industrial o los eventos extremos derivados del cambio climático.

En este sentido, el manejo racional de nutrientes, la restauración química mediante biochar, compost o zeolitas, y la promoción de una **fertilidad ecológica** son componentes esenciales para mantener los suelos como amortiguadores naturales de perturbaciones y sumideros efectivos de carbono y contaminantes.

### **10.2 Retos de investigación y desarrollo tecnológico**

Los avances en ciencias ambientales y geoquímica abren nuevas líneas de investigación para la próxima década, entre las cuales destacan:

- **Nanomateriales y geoquímica avanzada:** Aplicación de nanopartículas de óxidos metálicos, biochar nanoestructurado y arcillas funcionalizadas para adsorber metales pesados, colorantes y compuestos orgánicos persistentes. Evaluación de la toxicidad y sostenibilidad de estos materiales bajo condiciones tropicales como las del Ecuador.
- **Secuestro y dinámica del carbono edáfico:** Cuantificación del carbono orgánico y su estabilidad a largo plazo mediante técnicas isotópicas y modelación molecular. Promoción de estrategias de **carbon farming** y agricultura regenerativa como contribución directa a la mitigación del cambio climático.
- **Modelamiento geoquímico y simulación ambiental:** Uso de softwares como PHREEQC, Visual MINTEQ o Geochemist's Workbench para predecir la movilidad y especiación de contaminantes bajo diferentes escenarios de pH, Eh y mineralogía.

Integración de modelos de transporte reactivo con herramientas de inteligencia artificial para optimizar decisiones en restauración de suelos.

- **Interacción suelo-agua-atmósfera:** Evaluación de flujos gaseosos ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) y su relación con procesos de oxidación-reducción y calidad química del suelo. Investigación de estrategias naturales para disminuir las emisiones desde los suelos agrícolas y urbanos.

### 10.3 Perspectivas para el Ecuador y América Latina hacia 2030

En el contexto latinoamericano, la aplicación de la química del suelo a la ingeniería ambiental enfrenta desafíos y oportunidades concretas:

- **Fortalecimiento institucional:** Es necesario consolidar laboratorios ambientales acreditados, protocolos nacionales armonizados (INEN-ISO) y redes interinstitucionales de monitoreo edáfico.
- **Capacitación y formación profesional:** Las universidades deben integrar la **química ambiental de suelos** como eje formativo transversal en los programas de ingeniería, agronomía y gestión ambiental.
- **Gestión sostenible y política pública:** Incorporar indicadores químicos del suelo en los sistemas nacionales de información ambiental (como el SIAGA o el MAATE) para la planificación territorial y la evaluación de impacto ambiental.
- **Innovación tecnológica y transferencia:** Impulsar proyectos de bioeconomía y economía circular basados en la **valorización de residuos orgánicos** y su transformación en enmiendas químicamente estables.
- **Cooperación regional:** Fomentar alianzas entre países andinos y amazónicos para el monitoreo transfronterizo de la calidad química del suelo y la restauración de ecosistemas degradados.

#### **10.4 Reflexión final**

El futuro de la gestión del suelo en América Latina requiere una visión integrada entre la química, la ingeniería y la sostenibilidad. El suelo debe concebirse no solo como un recurso productivo, sino como un sistema reactivo esencial para la estabilidad climática, la seguridad alimentaria y la salud ambiental. Avanzar hacia una química de suelos orientada a la resiliencia implica combinar la innovación tecnológica con la responsabilidad ética, promoviendo un modelo de desarrollo basado en la restauración, la eficiencia y la armonía con la naturaleza.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adriano, D. C. (2001). *Trace elements in terrestrial environments* (2nd ed.). Springer.

Alloway, B. J. (2013). *Heavy metals in soils* (3rd ed.). Springer.

Alleoni, L. R. F., & Mello, J. W. V. (2005). *Química e mineralogia do solo* (Vol. 2). SBCS.

APHA, AWWA, & WEF. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). APHA.

ASTM International. (2019). *ASTM D4972-19: Standard Test Method for pH of Soils*. ASTM.

ASTM International. (2021). *ASTM D854-14(2021): Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. ASTM.

Baker, D. E., & Senft, J. P. (1995). *Copper*. In B. J. Alloway (Ed.), *Heavy metals in soils* (pp. 179–205). Springer.

Bremner, J. M. (1996). *Nitrogen—Total*. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods* (pp. 1085–1121). SSSA.

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson.

Bohn, H. L., McNeal, B. L., & O'Connor, G. A. (2015). *Soil chemistry* (3rd ed.). Wiley.

Bolan, N., Adriano, D., & Naidu, R. (2003). Role of phosphorus in (im)mobilization and bioavailability of heavy metals in the soil–plant system. *Reviews in Environmental Contamination and Toxicology*, 177, 1–44.

Bolan, N. S., et al. (2014). Biochar for contaminated soil remediation: A review. *Soil Research*, 52(5), 489–511.

Cambardella, C. A., & Elliott, E. T. (1992). Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 777–783.

Camps-Arbestain, M., et al. (2015). Guidelines for producing biochar for soil applications. *International Biochar Initiative*.

Cecchi, G. (2008). *Manual de suelos y fertilidad de suelos*. Ediciones INTA.

Casanova, M., Salazar, O., Luzio, W., & Navia, R. (Eds.). (2013). *Química de suelos: aspectos básicos y aplicaciones*. Universidad de La Frontera.

CEC. (2006). *Directive 2006/118/EC on the Protection of Groundwater*. European Commission.

CEC. (2013). *COM(2013) 683: Soil thematic strategy—Implementation report*. European Commission.

Chowdhury, S., Mazumder, M. A. J., Al-Attas, O., & Husain, T. (2016). Heavy metals in drinking water: Occurrences, implications, and future needs. *Desalination and Water Treatment*, 57(1), 139–170.

Clemente, R., Escolar, Á., & Bernal, M. P. (2012). A field experiment on the phytoremediation of a contaminated soil by native vegetation under Mediterranean conditions: Trace element monitoring in soil and plant tissues. *Environmental Pollution*, 165, 3–10.

Conde, E., et al. (2015). Soil organic matter and its role in environmental sustainability. *Agrochimica*, 59(1), 1–16.

Corwin, D. L., & Lesch, S. M. (2005). Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46(1–3), 11–43.

Degryse, F., Smolders, E., & Parker, D. R. (2009). Mobility of Cd as affected by soil pH and organic carbon. *European Journal of Soil Science*, 60, 722–733.

Dermatas, D., & Meng, X. (2003). Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metals. *Engineering Geology*, 70, 377–394.

EEA. (2020). *Soil health and ecosystem services*. European Environment Agency.

EPA. (1996). *Soil Screening Guidance: Technical Background Document* (EPA/540/R-95/128). US EPA.

EPA. (1998). *Method 3050B: Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils*. US EPA.

EPA. (2007). *Method 3051A: Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soils and Oils*. US EPA.

EPA. (2014). *Method 6020B: Inductively Coupled Plasma—Mass Spectrometry*. US EPA.

EPA. (2018). *Method 6010D: Inductively Coupled Plasma—Atomic Emission Spectrometry*. US EPA.

FAO. (2006). *Guidelines for Soil Description* (4th ed.). FAO.

FAO. (2015). *Status of the World's Soil Resources (SWSR)*. FAO/ITPS.

FAO. (2017). *Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management*. FAO.

FAO. (2018). *Global Soil Organic Carbon Map (GSOCmap)*. FAO & GSP.

FAO. (2020). *GSOCseq: Potential of soils to sequester carbon*. FAO & GSP.

FAO. (2022). *World Reference Base for Soil Resources (WRB 2022)*. FAO/IUSS/ISRIC.

Fendorf, S., & Sparks, D. L. (1996). X-ray absorption fine structure spectroscopy. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods* (pp. 377–416). SSSA.

Fierer, N. (2017). Embracing the unknown: Disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nature Reviews Microbiology*, 15, 579–590.

Filcheva, E., & Tsadilas, C. (2002). Influence of clinoptilolite and compost on soil properties. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33, 595–607.

Galli, A., et al. (2012). The eco-footprint of agricultural systems. *Journal of Industrial Ecology*, 16(1), 11–23.

Gee, G. W., & Or, D. (2002). Particle-size analysis. In J. H. Dane & G. C. Topp (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 4: Physical Methods* (pp. 255–293). SSSA.

Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics*. Academic Press.

Hofman, J., Hovorková, I., & Vácha, R. (2014). Passive sampling methods for monitoring pollutants in soil. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 62, 41–49.

IPCC. (2019). *Climate Change and Land*. IPCC.

IPCC. (2021). *AR6—The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.

IPCC. (2022). *AR6—Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press.

IPCC. (2022). *AR6—Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press.

ISO. (2015). *ISO 11074: Soil quality—Vocabulary*. ISO.

ISO. (2017). *ISO 18400 (series): Soil quality—Sampling*. ISO.

ISO. (1995). *ISO 11466: Soil quality—Extraction of trace elements soluble in aqua regia*. ISO.

ISO. (1995). *ISO 10694: Soil quality—Determination of organic and total carbon by dry combustion*. ISO.

ISO. (2012). *ISO 13878: Soil quality—Determination of total nitrogen content by dry combustion*. ISO.

ISRIC. (2020). *Soil information and global mapping resources*. ISRIC—World Soil Information.

IUSS. (2014). *Soil carbon* (IUSS Working Group). Springer.

Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace elements in soils and plants* (4th ed.). CRC Press.

Khalid, S., Shahid, M., et al. (2017). A review of environmental contamination and health risk assessment of heavy metals in Pakistan. *Chemosphere*, 191, 14–27.

Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). *Biochar for environmental management* (2nd ed.). Routledge.

Lindsay, W. L. (1979). *Chemical equilibria in soils*. Wiley.

Lu, R. (2000). *Analytical methods for soils and agricultural chemistry*. China Agricultural Science and Technology Press.

Luo, L., Ma, Y., Zhang, S., Wei, D., & Zhu, Y.-G. (2009). An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2524–2530.

MAAE (Ecuador). (2020). *Norma de calidad ambiental del suelo y niveles guía de remediación*. Ministerio del Ambiente y Agua.

MAATE (Ecuador). (2022). *Estándares de calidad ambiental del suelo—Libro VI del TULSMA (actualización)*. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica.

McBride, M. B. (1994). *Environmental chemistry of soils*. Oxford University Press.

MEF–SENPLADES (Ecuador). (2021). *Plan Nacional de Desarrollo 2021–2025*. Gobierno del Ecuador.

Méndez, A., & Gascó, G. (2012). Biochar and its role in improving soil properties. *Soil Science and Plant Nutrition*, 58, 517–523.

Nannipieri, P., Trasar-Cepeda, C., & Dick, R. (2018). Soil enzyme activity: A brief history and biochemistry as a basis for appropriate interpretations and meta-analysis. *Biology and Fertility of Soils*, 54, 11–19.

Naidu, R., et al. (2008). *Chemical bioavailability in terrestrial environments*. Elsevier.

NRC. (2003). *Environmental cleanup at naval facilities: Risk-based methods*. National Academies Press.

O'Connor, D., et al. (2018). Remediation of soil contaminated with heavy metals using biochar. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 48(6), 489–543.

OECD–FAO. (2019). *Guidelines for environmental performance of agriculture*. OECD/FAO.

Oliver, M. A., & Bishop, T. F. A. (2023). *Precision agriculture for sustainability*. Burleigh Dodds.

Pansu, M., & Gautheyrou, J. (2006). *Handbook of soil analysis*. Springer.

Pimentel, D., & Burgess, M. (2013). Soil erosion threatens food production. *Agriculture*, 3(3), 443–463.

Rattan Lal. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123, 1–22.

Rattan Lal. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875–5895.

Rodríguez-Lado, L., et al. (2013). Cadmium in European soils: Distribution, origin and risk. *Nature Geoscience*, 6, 324–328.

Rowell, D. L. (1994). *Soil science: Methods and applications*. Longman.

Sastre-Conde, I., et al. (2015). Zeolites in environmental remediation. *Microporous and Mesoporous Materials*, 214, 90–97.

Schindler, D. W. (2006). Recent advances in the understanding and management of eutrophication. *Limnology and Oceanography*, 51, 356–363.

Schnoor, J. L. (1997). *Environmental modeling: Fate and transport of pollutants in water, air, and soil*. Wiley.

Sposito, G. (2008). *The chemistry of soils* (2nd ed.). Oxford University Press.

Sparks, D. L. (2003). *Environmental soil chemistry* (1st ed.). Academic Press.

Sparks, D. L., Singh, B., & Siebecker, M. G. (2023). *Environmental soil chemistry* (3rd ed.). Elsevier.

SSSA. (2017). *Methods of Soil Analysis* (Book Series). Soil Science Society of America.

Sumner, M. E., & Naidu, R. (1998). *Sodic soils: Distribution, properties, management, and environmental consequences*. Oxford University Press.

Tóth, G., Hermann, T., et al. (2016). Heavy metals in agricultural soils of the European Union. *Geoderma*, 182–183, 14–20.

UNEP. (2013). *Global chemicals outlook*. United Nations Environment Programme.

USDA NRCS. (2014). *Soil Survey Laboratory Methods Manual* (SSIR 42, v.5.0). USDA.

- USDA NRCS. (2017). *National Soil Survey Handbook*. USDA.
- USEPA. (2002). *Guidance for comparing background and chemical concentrations in soil* (EPA 540-R-01-003). US EPA.
- USEPA. (2016). *Regional Screening Levels (RSLs) User's Guide*. US EPA.
- van der Perk, M. (2013). *Soil and water contamination: From molecular to catchment scale* (2nd ed.). CRC Press.
- Vareda, J. P., Valente, A. J., & Durães, L. (2019). Assessment of heavy metal pollution in soils. *Journal of Environmental Management*, 246, 101–111.
- Vithanage, M., et al. (2017). Natural and synthetic zeolites for environmental cleanup. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(1), 1–10.
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter. *Soil Science*, 37, 29–38.
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2016). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson.
- WHO/FAO. (2011). *Joint FAO/WHO Expert Consultation on the risks and benefits of fish consumption*. (Secciones sobre metales en suelos y cadenas tróficas).
- Wilding, L. P., Smeck, N. E., & Hall, G. F. (Eds.). (1983). *Pedogenesis and soil taxonomy*. Elsevier.
- Yong, R. N., Mohamed, A. M. O., & Warkentin, B. P. (1992). *Principles of contaminant transport in soils*. Elsevier.
- Zhu, Y.-G., et al. (2016). Soil biogeochemistry: An integrated approach. *Nature Reviews Earth & Environment* (perspectives y revisiones relacionadas).

Las características del suelo son las siguientes:

$$\text{Valor } T = 30 \text{ mmol. } 100 - 1 \text{ g ss}$$

*NOTA: el sodio permisible será siempre el 10 % del valor T*

$$Na + \text{Intercambiable} = 6 \text{ mmol. } 100 - 1 \text{ g ss}$$

$$da = 1,3 \text{ g.cm}^{-3}$$

$$pH = 8$$

*La dosis activa se calcula por el método de Margulis (se calcula para el  $\text{CaSO}_4$ ), se*

*la fórmula:*

$$Da = 0,086 (Na + int - Na + perm) h. da$$

*Donde:*

$$Da = \text{Dosis activa (es la cantidad de yeso puro en t. ha}^{-1}\text{)}$$

$$0,086 = \text{es la masa de 1 mmol de } \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$$

$$Na + int = Na + \text{intercambiable.}$$

$$Na + perm = Na + \text{permisible}$$

$$Na + int / Na + perm = Na + a \text{ desplazar}$$

$$h = \text{profundidad (cm)}$$

$$da = \text{densidad aparente}$$

$$30 \text{ mmol. } 100 \text{ g}^{-1} \text{ ss X}$$

$$Na + \text{Permisible} = \frac{30 \text{ mmHg} \cdot 100^{-1} \text{ ss}}{100\%} = \frac{1}{10\%}$$

| Exposición por                                      | Exposición por                                      | Exposición por                                      |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Dr. C. Juan Carlos Vello<br>Comisión de la Comisión | Dr. C. Juan Carlos Vello<br>Comisión de la Comisión | Dr. C. Juan Carlos Vello<br>Comisión de la Comisión |

ENCUESTA SOBRE EL COMPROMISO

Na + permisible = -----  
----- = -----

100% 10 %

ESTO ES LO QUE ESTA ESCRITO A TINTA DEBAJO

$$X = 3 \text{ mmol} \cdot 100 - 1 \text{ g ss}$$

$$Da = 0,086 (6 - 3) 30.1,3 = 10,06 \text{ t.ha} - 1 \text{ CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$$

$$Na + perm = Na + permisible$$

$$Na + int / Na + perm = Na + a \text{ desplazar}$$

$$h = \text{profundidad (cm)}$$

$$da = \text{densidad aparente}$$

$$30 \text{ mmol} \cdot 100 \text{ g} - 1 \text{ ss } X$$

$$Na + permisible$$

$$= \text{-----}$$

$$= \text{-----}$$

$$100\% \text{ } 10\%$$

$$X = 3 \text{ mmol} \cdot 100 - 1 \text{ g ss}$$

$$Da = 0,086 (6 - 3) 30.1,3 = 10,06 \text{ t.ha} - 1 \text{ CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} X \\ = 3 \text{ mmol} \cdot 100 - 1 \text{ g ss}$$

$$Da = 0,086 (6 - 3) 30.1,3 = 10,06 \text{ t.ha} - 1 \text{ CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$$