

UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA

**COMPARACIÓN DEL MÉTODO MEHLICH III vs MÉTODOS GLOSOLAN
PARA EVALUACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE MACRONUTRIENTES DEL
SUELO**

POR:

MIGUEL ALEJANDRO MONTOYA ARGUETA

TESIS



CATACAMAS, OLANCHO

HONDURAS, C.A

SEPTIEMBRE, 2025

COMPARACIÓN DEL MÉTODO MEHLICH III vs MÉTODOS GLOSOLAN PARA
EVALUACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE MACRONUTRIENTES DEL SUELO

POR

MIGUEL ALEJANDRO MONTOYA ARGUETA

M.Sc. CARLOS ROBERTO IRÍAS ZELAYA

Director de Tesis

Ph. D JOSE TRINIDAD REYES

M.Sc EMILIO JAVIER FUENTES

Asesor Auxiliar

Asesor auxiliar

TESIS

PRESENTADO A LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA
COMO REQUISITO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RECURSOS NATURALES

CATACAMAS

OLANCHO

SEPTIEMBRE, 2025

DEDICATORIA

Primeramente agradecerle a Dios por permitirme llegar hasta aquí y lograr desarrollar con éxito esta investigación la cual no solo me ha generado conocimiento sino que también me ha dejado muchas experiencias en cada momento que dedique a trabajar en ella.

A mis padres Miguel A. Montoya A. y Bessy Argueta R., que han sido una de mis motivaciones para lograr avanzar y terminar mi investigación; siendo ellos un pilar para mi y acompañándome en todo mi proceso académico.

A mi hermana Danna M. Montoya A., por motivarme y demostrarme que todo se puede a pesar de que el proceso sea lento, difícil y lleno de incertidumbre.

De igual manera, me agradezco a mí mismo, por haber tomado la iniciativa de desarrollar esta investigación, sin imaginar la magnitud del esfuerzo, la dedicación y el trabajo que implicaría. Este proceso me permitió adquirir un valioso grado de conocimiento en cada una de las etapas realizadas durante el desarrollo del estudio.

AGRADECIMEINTOS

Agradecerle nuevamente a Dios estar siempre presente y ayudarme a llegar hasta este punto de mi carrera universitaria siempre con paciencia, sabiduría donde e tenido altos y bajos pero siempre em compañía de el.

Agradecer a mi asesor principal M.Sc Carlos Roberto Irías Z. por brindarme parte de su tiempo, conocimiento, paciencia y experiencia a lo largo de este trabajo investigativo , de igual forma agradecerles a mis asesores auxiliares Ph.D. José Trinidad Reyes S. y M.Sc. Javier Emilio Fuentes Z.; por sus consejos, por su guía, paciencia y ayuda en está investigación, los cuales considero que son excelentes personas y respetables docentes.

Me contenta saber que esta experiencia la puede vivir enconjunto con mis amigos los cuales estuvieron para darme su apoyo, agradecerles a: Christopher Argueta, Dulce Gómez, Javier Mejía, Astrid Hernández, Greisy Morazán, y a todas las personas involucradas en esta experiencia.

INDICE

RESUMEN	1
I. INTRODUCCIÓN.....	2
II. OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo General	3
2.2 Objetivos Específicos	3
III. HIPOTESIS	4
IV. MARCO TEÓRICO.	5
4.1 Suelo	5
4.2 Fertilidad del suelo	6
4.2.1 Importancia de la Fertilidad de suelos en la producción agrícola	6
4.2.2 Factores que afectan la disponibilidad de nutrientes en el suelo	7
4.3 Propiedades del suelo	7
4.3.1 Propiedades Físicas	7
4.3.1. Estructura del suelo	7
4.3.2 Textura.....	8
4.3.2.1 La textura de suelo y la disponibilidad de nutrientes	8
4.3.3 Humedad.....	9
4.3.4 Color	10
4.4 Propiedades Químicas	10
4.4.1 pH.	10
4.4.1.1 Como el pH puede afectar la disponibilidad de nutrientes en el suelo	11
4.4.2 La Capacidad de Intercambio Catiónico	11
4.4.3 Materia Orgánica	12
4.5 Macro- Micro nutrientes del suelo.....	13
4.5.1 Macronutrientes del suelo.....	13
4.5.2 Micronutrientes.....	13
4.6 Importancia de los macronutrientes en el suelo.....	14
4.6.1 Función de los Macronutrientes en el suelo y relación con las plantas	14
4.7 Análisis de Suelo	15
4.7.1 Importancia de análisis de suelo.....	15

4.7.2 Evolución histórica de los métodos de análisis químico de suelos	16
4.8 Metodologías basadas en Análisis de suelos	17
4.8.1 Método Bray I y II	17
4.8.2 Método Mehlich I	18
4.8.3 Método Olsen	18
4.8.4 Método Kjeldahl	18
4.9 Ventajas y limitaciones de los métodos químicos tradicionales	19
4.10 Importancia de la estandarización en el análisis de suelos	20
4.11 Metodología de análisis Mehlich III	21
4.12 Metodología de procedimientos GLOSOLAN	22
4.12.1 Método de Materia Orgánica (Método Walkley-Black- Modificado)	22
4.12.2 Método para determinar pH	23
4.12.3 Método Bouyoucos para determinar Textura del suelo	23
4.12.4 Principales metodologías promovidas por GLOSOLAN	24
4.12.5 Beneficios de estandarización de Metodologías GLOSOLAN	24
4.13 Comparación de metodologías en la determinación de macronutrientes	25
4.14 Análisis de suelos en perspectiva de gestores en recursos naturales	25
V. MATERIALES Y METODOS	27
5.1. Descripción del lugar de la investigación	27
5.1.1 Población Muestral en base al desarrollo de la investigación	27
5.1.2 Condiciones de muestra para la investigación	27
5.2 Procedimiento Analítico Mehlich III	28
5.2.1 Procedimiento para extraer nutrientes con Mehlich III	28
5.2.2 Procedimiento para determinar Potasio, Calcio y Magnesio con Mehlich III	28
5.2.3 Procedimiento para determinar Fósforo con Mehlich III	29
5.2.4 Procedimientos analíticos GLOSOLAN	29
5.2.4.1 Procedimiento para extraer las Bases intercambiables	29
5.2.4.2 Determinación de Potasio, Calcio y Magnesio método GLOSOLAN.	30
5.2.4.3 Procedimiento analítico para Fósforo método GLOSOLAN	30
5.2.5 Determinación de materia orgánica (Método Walkley-Black- Modificado)	31
5.2.6 Determinación de pH relación 1; 2.5	31
5.2.7. Determinación de textura (Método Boyucos)	32
5.3 Variables	32
5.3.1 Determinación de Bases Intercambiables con método Mehlich III	32

5.3.2 Determinación de Fósforo método Mehlich III.....	33
5.3.3 Determinación de Bases Intercambiables con Método GLOSOLAN.....	33
5.3.4 Determinación de Fósforo con Método GLOSOLAN	34
5.3.5 Determinación de Materia Orgánica del Suelo.....	34
5.3.6 Determinación de pH.....	35
5.3.7 Calculo de la Textura del suelo	35
6. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	36
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
6.1 Análisis Bloxplot por Metodología Mehlich III y Metodología GLOSOLAN	38
6.2 Comparación descriptiva de macronutrientes determinados por método Mehlich III y GLOSOLAN.....	38
6.2.1 Comparación descriptiva de disponibilidad de Fósforo	39
6.2.2 Comparación descriptiva de disponibilidad de Potasio	39
6.2.3 Comparación descriptiva de disponibilidad de Calcio	40
6.2.4 Comparación descriptiva de disponibilidad de Magnesio	40
6.3 Análisis de Regresión por Metodología Mehlich III y Metodología GLOSOLAN...	41
6.3.1 Análisis de regresión de Fosforo en Método Mehlich III vs Metodología GLOSOLAN.....	41
6.3.2 Análisis de Regresión de Potasio en Metodología Mehlich III versus Metodología GLOSOLAN.....	43
6.3.3 Análisis de Regresión de Calcio en metodología Mehlich III versus metodología GLOSOLAN.....	44
6.3.4 Análisis de Regresión de Magnesio en metodología Mehlich III versus metodología GLOSOLAN.....	45
6.4. Correlaciones entre metodología Mehlich III y GLOSOLAN en proporción a las variables.....	47
VII. CONCLUSIONES	51
VIII. RECOMENDACIONES	52
IX. BIBLIOGRAFIA.....	53
ANEXOS	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Carta para la Determinación de Texturas de suelos "Copiado de U.S. Department of Agriculture Bureau of Plant Industry, Soils and Agricultural Engineering	36
Figura 2 Boxplot de Nutrientes de suelo por medio de la metodología Mehlich III y metodología GLOSOLAN en los macronutrientes P, Ca, K, Mg	38
Figura 3 Regresión lineal de Fósforo (P) por método Mehlich III versus metodología GLOSOLAN.....	42
Figura 4 Regresión lineal de Potasio (K) por método Mehlich III versus metodología GLOSOLAN.....	43
Figura 5 Regresión Lineal de Calcio (Ca) por método Mehlich III versus método GLOSOLAN.....	45
Figura 6 Regresión Lineal de Magnesio (Mg) por método Mehlich III versus método GLOSOLAN.....	46
Figura 7 Matriz de correlación de parámetros físico-químicos de suelos analizados.....	48

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Ventajas y limitaciones en base análisis químicos de manera tradicional (Juarez, 2021), Modificada, 2025.....	20
--	----

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 Pesado y adición de reactivo para análisis de Textura.....	68
Anexo 2 Agitación y toma de lecturas con Hidrómetro para análisis de Textura de suelo..	68
Anexo 3 Pesado de suelo para análisis de Materia Orgánica y adición de reactivo	69
Anexo 4 Titulación de análisis de Materia Orgánica	69
Anexo 5 Agregado de solución Bray-II y filtrado para análisis de Fósforo por metodología GLOSOLAN.....	70
Anexo 6 Lectura de muestra de suelo en equipo Espectrofotómetro de UV- visible.....	70
Anexo 7 Filtrado y extracto de Solución Mehlich-III	71
Anexo 8 Preparación de reactivo de Acetato de Amonio pH7 de metodología GLOSOLAN	71
Anexo 9 Preparación de filtrado para ser analizadas en EAA.....	72
Anexo 10 Lectura de muestras en Espectrofotómetro de Absorción Atómica (análisis de elementos K, Ca, Mg entre otros).....	72
Anexo 11 Espectrofotómetro UV- visible (análisis de Fósforo)	73

Montoya Argueta, M. A. 2025. Comparación del método Mehlich III vs Métodos GLOSOLAN para evaluación de disponibilidad de macronutrientes del suelo. Universidad Nacional de Agricultura, Olancho, Honduras. Tesis Ingeniería en Gestión Integral de los Recursos Naturales. Olancho, Honduras, C.A. 83 p.

RESUMEN

La Investigación se desarrolló en el Laboratorio de Suelos Agrícolas PhD. Elio Durón Andino de la Universidad Nacional de Agricultura (UNAG), con el propósito de Comparar el método estandarizado Mehlich III con los métodos promovidos por GLOSOLAN para la evaluación de la disponibilidad de macronutrientes (P, K, Ca, Mg) en suelos agrícolas, a fin de valorar su grado de concordancia y la factibilidad de armonización metodológica. Se analizaron 126 muestras representativas a nivel nacional, previamente acondicionadas en el banco de muestras del laboratorio de la UNAG. En la metodología de Mehlich III se empleó una solución extractora multielemental de ácidos y sales, mientras que en GLOSOLAN se basó en una solución de Acetato de amonio de pH 7 para bases intercambiables (Ca, Mg, K) junto con el procedimiento Bray II (P), además de métodos para determinar Materia orgánica, para pH del suelo y textura. Los resultados fueron sometidos a análisis estadísticos mediante boxplot donde los elementos Fósforo, Potasio y Calcio, presentaron muestras Outliers, en los análisis de regresión lineal de Fósforo, Calcio y Potasio presentaron r^2 débiles en comparación a Magnesio presento un r^2 positivamente moderado, en cuanto a la matriz de correlación se observó que el pH y CO se muestran de manera baja y no significativa y las correlaciones de los macroelementos Fósforo, Potasio, Calcio mostraron correlación alta y significativa y la correlación de pH y con los macroelementos Calcio, Magnesio y Fósforo resultado alta significativa a comparación de Potasio categorizada como no significativa; permitiendo así conocer los grados de sensibilidad por cada metodología en los suelos analizados.

Palabras clave: Acetato de Amonio, Bray II, correlación, bases intercambiables, CIC, fertilidad de suelo, multielemental, movilidad, disponibilidad de nutrientes, alta significativa, no significativa.

I. INTRODUCCIÓN.

Uno de los recursos más indispensables para la interacción de las diferentes especies que habitan en el planeta; es el Suelo, donde hay diferentes interacciones y procesos los cuales se atribuyen a su formación y agregación, permitiendo así procesos como, infiltración, erosión de las rocas, retención de agua, movilidad de nutrientes, capacidad de intercambio catiónico, niveles de pH entre otros.

El suelo siempre ha presentado desgaste tanto en su parte física y parte química por las actividades antropogénicas y las malas prácticas agrícolas que se ven envueltas al momento de producir los diferentes rubros agrícolas y deteriorando la salud del suelo por dichas actividades, es por eso que se generan diferentes herramientas metodológicas tales como: Bray I, Bray II, Mehlich I, Mehlich III, Olsen, procedimientos GLOSOLAN; para realizar análisis en muestras de suelo desarrollados en laboratorios y así conocer los niveles de fertilidad del suelo.

Y en base a las diferentes metodologías creadas y utilizadas a nivel mundial cada laboratorio obtiene dicha libertad para trabajar con las metodologías que observen más confiable o acertada al momento de realizar los análisis, siendo así, existe la problemática de saber que datos son más precisos o acertados en los diferentes parámetros que avalúan las metodologías

Y en base a la incertidumbre de conocer o de tener certeza en los resultados el propósito de la investigación es poner a prueba los niveles de solubilización en extracción de macronutrientes con metodología Mehlich III y procedimientos GLOSOLAN con el fin de conocer que tan predecibles son estas dos metodologías para la extracción de nutrientes.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Comparar el método estandarizado Mehlich III con los métodos promovidos por GLOSOLAN para la evaluación de la disponibilidad de macronutrientes en suelos agrícolas, a fin de valorar su grado de concordancia y la factibilidad de armonización metodológica.

2.2 Objetivos Específicos

Determinar los macronutrientes disponibles en muestras de suelo representativas del banco de muestras del Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional de Agricultura, aplicando las metodologías GLOSOLAN y Mehlich III, con el fin de comparar sus resultados.

Realizar análisis complementarios de pH, contenido de materia orgánica y textura del suelo en las muestras seleccionadas, con el fin de caracterizar integralmente las condiciones edáficas.

Evaluar la correlación entre los resultados de macronutrientes y las propiedades del suelo, para establecer su relación y grado de concordancia entre los métodos aplicados.

III. HIPOTESIS

Hipótesis nula (H_0):

No existen diferencias significativas entre los resultados obtenidos por el método Mehlich III y los métodos promovidos por GLOSOLAN en la determinación de macronutrientes en las muestras de suelo, ni correlación relevante con las propiedades edáficas (pH, materia orgánica y textura).

Hipótesis alternativa (H_1):

Existen diferencias significativas entre los resultados obtenidos por el método Mehlich III y los métodos promovidos por GLOSOLAN en la determinación de macronutrientes en las muestras de suelo, y dichas diferencias se relacionan de manera significativa con las propiedades edáficas (pH, materia orgánica y textura).

IV. MARCO TEÓRICO.

4.1 Suelo

Conocido como cuerpo natural basándose en capas del mismo de formas horizontales formando los horizontes del suelo constituyentes en capas; mediante la meteorización de los minerales, materia orgánica, aire y agua a través de lo largo del tiempo y la combinación de clima, topografía, vida macro-micro de organismos y a su vez siendo complementada por macro-micro nutrientes presentes (FAO, 2024).

Así mismo, Hillel (1998) considera que el suelo es un cuerpo natural involucrado en interacciones dinámicas con la atmósfera que está encima y con los estratos que están debajo, y el ciclo hidrológico del planeta y que sirve como medio de crecimiento.

Los suelos además de ser formados por acumulación de partículas y de rocas a lo largo de siglos de historia involucra variantes infiriendo en lo: físico, químico y lo biológico. Donde son más visibles en los puntos que son llamados comúnmente como fallas de suelo (Zapata Miller, 2013). En Honduras la mayoría de los suelos se componen de gran cantidad de materia mineral y sus niveles de materia orgánica son escasos o deficientes en su totalidad, exceptuando zonas de bosques de hoja anchas o caducifolios en donde el hombre no ha intervenido (León, 2001).

4.2 Fertilidad del suelo

La fertilidad hace referencia al potencial que existe en el suelo para crear o generar condiciones químicas, físicas y biológicas favorables para las plantas y los microorganismos que viven en el suelo proporcionando así los nutrientes esenciales para el crecimiento. También considerando que los nutrientes minerales no son alimentos para las plantas, sino, un suplemento que les proporciona energía para el desarrollo de las mismas (Cherlinka, 2018).

4.2.1 Importancia de la Fertilidad de suelos en la producción agrícola

En el sector agrícola siempre se busca la manera de aumentar significativamente el hecho de satisfacer la creciente demanda de los alimentos de una población en crecimiento, dicho desafío se agrava por los factores climáticos como el calentamiento global y riesgos asociados con las pérdidas de rendimiento en el aspecto de calidad de suelo (Macholdt *et al.*, 2021).

Desde el punto de vista agronómico y ambiental la fertilidad puede describirse como la productividad del suelo y la capacidad para proporcionar condiciones de crecimiento favorables para las plantas y así obtener rendimientos estables, al mismo tiempo conteniendo rendimientos estables sería un indicador en base a la salud del suelo y su fertilidad. (Estrada *et al.*, 2017).

A pesar de la disponibilidad de nutrientes y de los indicadores de fertilidad que lo acompañan tales como (pH, materia orgánica, bases intercambiables, CIC, respiración del suelo, contenido de carbono, macrofauna, microorganismos) la evaluación de la fertilidad del suelo sigue siendo una de las tareas más complejas y difíciles de estimar, debido a los manejos y prácticas que se realizan en los suelos de maneras convencionales o de manera no sostenibles (Rabot *et al.*, 2018).

4.2.2 Factores que afectan la disponibilidad de nutrientes en el suelo

La fertilidad de un suelo no solo depende de las cantidades totales de minerales que contenga el mismo, sino que también de múltiples condiciones químicas como pH, CIC, Carbonatos; también de aspecto físicos como clima, textura de suelo, estructura de suelos, la capacidad de retención de agua, conductividad eléctrica y densidad aparente y a su vez factores biológicos como materia orgánica, microorganismos, ciclos biogeoquímicos (Javed *et al.*, 2022).

4.3 Propiedades del suelo

Según Frye (1982), citando a (Mokma *et al.*, 1996). Denomina que el intercambio o la mezcla de los diferentes materiales por lo que está conformado el suelo como tal se basa en la combinación de los horizontes y a diferentes factores que van desde la erosión, compactación, escorrentías, baja capacidad de almacenamiento de nutrientes entre otros (Brunel *et al.*, 2011).

De igual manera el estado de las propiedades del suelo está estrechamente relacionado con la cantidad de mineral y la cantidad de retención de minerales que el suelo puede llegar a almacenar y así definir el tipo de suelo en base a esas propiedades físicas, químicas y biológicas (Dalzell *et al.*, 1991).

4.3.1 Propiedades Físicas

4.3.1. Estructura del suelo

El suelo lo conforman diferentes tipos de capas de suelo y variantes de suelo hablando a nivel de partículas como tal, las cuales estas pueden llegar a ser fragmentadas en tamaños

moderados y de menor tamaño, sin que exista una intervención de actividad o alteración humana. (Hernandez Jiménez *et al.*, 2010).

Del mismo modo hay factores que están relacionados con la estructuración del suelo (Irán Borjoques, 2010). La agrupación y disposición de las partículas en el suelo pueden ser muy porosos y estos forman agregados y pueden variar en tamaño y forma desde pequeños grupos hasta grandes bloques de suelo (Basset *et al.*, 2023).

La estructura de los suelos afecta diversos procesos como aireación, movimiento de agua, nutrientes y actividad biológica factores que impactan directamente sobre la abundancia, actividad y rendimientos en la calidad de suelo (Ortega, 2022).

4.3.2 Textura

Se le conoce como la porción que existe entre arena, limo y arcilla presente en el suelo, donde existe un diferente comportamiento a los diferentes tipos de suelo, en cuanto más pequeñas las partículas la textura del suelo será de tipo arcilloso y en cuanto más grande sea la partícula el tipo de textura será de tipo arenoso (Castellanos, 2000).

4.3.2.1 La textura de suelo y la disponibilidad de nutrientes

Las arcillas y partículas de limo son una de las partículas de suelo más pesadas, pesadas y grandes y además contienen cargas positivas y negativas lo que representa una alta probabilidad de capacidad de intercambio catiónico donde pueden llegar a tener una mayor capacidad de retención de nutrientes tales como el elemento de calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y iones de amonio (NH_4^+), al mismo tiempo los elementos como el hierro (Fe) y aluminio (Al^+) se adhieren más fácil a las partículas de arcilla haciendo que el elemento de fósforo (P) se vuelva de manera insoluble y menos disponible para CIC (CLARK, 2023).

De igual forma las concatenaciones de las partículas de arcillas pueden llegar a afectar a los nutrientes y estos llegando a reaccionar de manera insolubles y muy poco móviles, restringiendo así la disponibilidad para las plantas y estas tenga dificultades para su desarrollo, al mismo tiempo la arcilla ralentiza el proceso de los microorganismos para la descomposición de la materia orgánica y contribución a tener suelos con más presencia de nutrientes (Zheng *et al.*, 2024).

En relación a los suelos arenosos tiene esa característica que al contener partículas pequeñas los nutrientes tienen el grado de facilitar su movimiento por el suelo, haciendo que exista una muy baja relación de CIC y de paso al proceso de lixiviación y dichos nutrientes estén fuera de alcance para las plantas; en el caso del elemento de fósforo tiende a ser más fácil de lixiviar y el aspecto de materia orgánica también se ve afectada por que el tipo de textura limita su proceso de degradación por la poca presencia de microorganismos haciendo que el aporte biológico se vea de manera muy limitada y provocando un nivel de nutrientes bajos presentando deficiencias (Chen *et al.*, 2025)

4.3.3 Humedad

La humedad del suelo, también conocida como contenido de agua, es la cantidad de agua contenida en el suelo, ya que actúa como portador de nutrientes para las plantas, contribuye a la regulación de la temperatura del suelo, y beneficia a la actividad microbiana y a muchas actividades esenciales para el crecimiento de las plantas (Gutierrez *et al.*, 2012).

En dado caso que el suelo presente déficit de agua/humedad el suelo disminuye la disponibilidad de nutrimentos a pesar de que se encuentren presentes y en cantidades suficientes (Tejerina *et al.*, 2018). Siendo en caso contrario si el suelo presenta excesos de humedad o inclusive inundaciones el oxígeno presente en el suelo se desplaza por el agua, transformando el ambiente en un entorno anaeróbico, dejando a los microorganismos como alternativa utilizar los elementos minerales presentes para su ciclo vital. (Cenicaña ,2016)

4.3.4 Color

El color del suelo es causado por los minerales presentes y por el contenido de materia orgánica. El suelo puede exhibir una amplia gama de colores; grises, negros, blancos, rojos, marrones, amarillos y en ciertas condiciones, verdes. El color del suelo se describe utilizando términos generales como “marrón oscuro”, pero también se puede describir de manera más técnica, utilizando las tablas de colores del suelo de Munsell (FAO, 2020).

4.4 Propiedades Químicas

4.4.1 pH.

Propiedad química del suelo que indica la capacidad de las partículas de un suelo para absorber iones de (Hidrogeno) H^+ , lo cual esto determina si un suelo es ácido o alcalino; esta propiedad influye en la solubilidad, movilidad, disponibilidad de nutrientes y de componentes inorgánicos en el suelo (Barbaro *et al.*, 2019).

Castellanos (2000), clasifica el pH del suelo en cuatro categorías particulares: pH del suelo en cuatro categorías particulares: pH <4.0, el cual indica la presencia de ácidos libres como producto de la oxidación de los sulfuros; pH <5.5, valor que sugiere la presencia de aluminio intercambiable y/o exceso de manganeso; pH entre 7.3 a 8.4, intervalo que denota la presencia de carbonato de calcio ($CaCO_3$); y pH >8.2, donde existe un posible exceso de sodio intercambiable en el suelo.

4.4.1.1 Como el pH puede afectar la disponibilidad de nutrientes en el suelo

El pH es uno de los factores que favorece a la solubilidad de nutrientes y actividad de los microorganismos, lo que determina si las plantas pueden llegar a absorberlos o no. A niveles de pH bajos los elementos como Fósforo, calcio (Ca) bajan en sus niveles de concentración, y en el caso de los elementos de aluminio (Al^{+}) y manganeso (Mn) tienden a ser más solubles y pueden llegar a alcanzar niveles más tóxicos en el suelo, dañando los sistemas radiculares de las plantas, y en relación a los microorganismos las bacterias que son beneficiosas encargadas de descomponer la materia orgánica y que fijan nitrógeno (N) presentan un comportamiento de reducción (Kluepfel *et al.*, 2016).

A niveles de pH altos la disponibilidad de los nutrientes como hierro (Fe), zinc (Zn), boro (B) y cobre (Cu) disminuye considerablemente por ser suelos alcalinos y la actividad microbiana y hongos que son más tolerables o resistentes a la acidez suelen tener menos problemas o dificultades para trabajar el material del suelo (Williamson, 2013.)

4.4.2 La Capacidad de Intercambio Catiónico

Es una medida de cantidad de cargas negativas presentes en las superficies de los minerales y componentes orgánicos del suelo (arcilla, materia orgánica o sustancias húmicas) y representa la cantidad de cationes que las superficies pueden retener (Ca, Mg, Na, K, NH_4 etc.). Estos serán intercambiados por otros cationes o iones de hidrogeno presentes en la solución del suelo y liberados por las raíces. El nivel de CIC indica la habilidad de suelos a retener cationes, disponibilidad y cantidad de nutrientes a la planta, su pH potencial entre otras (FAO, 2020).

4.4.3 Materia Orgánica

El recurso suelo lo conocemos como gran organismo con seres de vida capaces de realizar interrelaciones con otros organismos con el fin de llevar funciones que conllevan un beneficio en específico, además el suelo contiene desde virus y bacterias hasta hongos y protozoos las cuales son encargadas de realizar actividad intensa para transformar mantos de organismos vegetales y animales muertos (Atlas *et al.*, 2001).

Sin embargo, la naturaleza y sus ciclos son conversiones mayormente biológicas contribuyendo de forma total tanto a la vida del suelo como a otros ciclos que están relacionados con la descomposición de la materia sobre la superficie del suelo en específico (Tortora *et al.*, 2001).

De igual forma la concentración de tales organismos son de manera intensiva la cual proporcionan sustratos húmicos (siempre y cuando las condiciones climáticas sean las adecuadas), a su mismo tiempo este tipo de seres son los responsables fijar algunos minerales mediante sus mecanismos, ya sea de forma anaeróbica y de forma aeróbica dejando de componentes disponibles el Carbono (C), Hidrógeno (H), Fosforo (F), Yodo (I), Nitrógeno (N) entre otros elementos (Plaster *et al.*, 2012).

En cambio, si en los suelos con presencia de materia orgánica no existe un equilibrio adecuado y con intervención de actividad humanan, está empieza a decaer y empieza un proceso de apropiación por la parte mineral y este déficit puede causar una alteración en la estructura del suelo aumentando así su vulnerabilidad (Milian Gay, 2015).

4.5 Macro- Micro nutrientes del suelo.

4.5.1 Macronutrientes del suelo

Siguiendo con el pensamiento de Carrillo (2022). Los macronutrientes se pueden definir como los elementos necesarios en grandes cantidades para asegurar el crecimiento y la supervivencia de las plantas. Es importante afirmar que la presencia de una cantidad suficiente de elementos nutritivos en el suelo no asegura por sí misma la correcta nutrición de las plantas, y que haya un equilibrio estable entre los macronutrientes existentes en él.

Así que los macronutrientes se complementan con los micronutrientes que existen en el suelo, los macronutrientes; Nitrógeno (N), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Fósforo (P), requieren ciertas condiciones de humedad para permitir que estos logren ser almacenados y que a su vez sean retenidos por las partículas de arcilla que llega a poseer el suelo, para que el suelo no entre en decaimiento nutricional y a su vez no altere otras proporciones o componentes del suelo (Hernández R., 2009).

Recordando que los macronutrientes y micronutrientes pueden llegar a variar en base a los niveles de PH que existe en el suelo, cabe de mencionar que en la mayoría de las situaciones los macronutrientes pueden aparecer en menor escala que lo recomendado cuando estos suelos suelen ser muy ácidos (Solís *et al.*, 2014).

4.5.2 Micronutrientes.

Se conoce a los micronutrientes por desempeñar muchos roles complejos en el desarrollo y la salud de la planta y salud del suelo. (Cooper *et al.*, 2017). De igual forma ciertas cantidades de los micronutrientes juegan papel importante en el proceso de transferencia de energía (Sarabia, 2022).

Por otra parte, cuando existe una buena calidad de nutrientes, se ajustan ciertos parámetros del suelo de forma natural o antropogénica para obtener beneficios a largo plazo, proporcionando condiciones idóneas para el futuro uso del suelo de forma beneficiosa y manteniendo una gestión integrada de nutrientes (Romero López *et al.*, 2020).

4.6 Importancia de los macronutrientes en el suelo

Como conocemos los macronutrientes o también conocidos como los macro elementos del suelo, se deben de almacenar en cantidades razonables para que el suelo cumpla de forma eficiente las entradas y salidas de los elementos en cuanto a los intercambios o ciclos que están presentes en el cómo lo suele ser la extracción de forma natural mediante la absorción de las plantas o por la extracción por actividades humanas (AEFA, 2021).

Berdegue S. (2023), menciona que de igual manera se reconoce que en el grupo de los macronutrientes se destacan tres en principales conocidos como la formula base de suelo *N, P, K* (Nitrógeno, Fosforo y Potasio) los cuales en su mayoría son los elementos predominantes en los diferentes tipos de suelos.

4.6.1 Función de los Macronutrientes en el suelo y relación con las plantas

Villagra (2019) hace referencia que los elementos macros del suelo proporcionan energía y los materiales de construcción para las innumerables sustancias que son esenciales para el crecimiento y parte de supervivencia de los organismos vivos; del mismo modo (Seoáñez *et al.*, 1999), denomina que los macronutrientes son elementos necesarios en cantidades relativamente abundantes para asegurar el crecimiento y supervivencia de las plantas.

4.7 Análisis de Suelo

En acorde de Cherlinka (2024)., menciona que los análisis de suelo son grandes aliados para los agricultores en la actualidad ya que debido a su productividad depende de calidad en suelos para sacar el mayor provecho a sus actividades de producción, además nos ayuda a indicar o a destacar la problemática que existe dentro de los parámetros de suelo.

A su vez un análisis de suelo no se centra en un solo objetivo, sino que abarca diferentes parámetros como puede ser desde el parámetro químico, contenido de metales pesados, niveles de pH, salinidad, biota terrestre, materia orgánica y nivel mineral o nivel de elementos (N, P, K entre otros) que contiene el suelo en su totalidad. (Singh Farmaha *et al.*, 2020).

Cabe recalcar que un análisis de suelos es una herramienta de gran utilidad para diagnosticar problemas nutricionales y establecer recomendaciones de fertilización y relación de enmiendas en algunos casos. Entre sus ventajas se destaca por ser un método rápido y de bajo costo, que le permite ser utilizado ampliamente por agricultores y empresas (Molina *et al.*, 2002).

La interpretación de los análisis se basa en estudios de correlación y calibración con la respuesta de las plantas a la aplicación de una cantidad dada del nutriente en relación al suelo y su capacidad de absorber (Cabalceta *et al.*, 2006).

4.7.1 Importancia de análisis de suelo

Con el análisis de suelos se pretende determinar el grado de suficiencia o deficiencia de los nutrientes del suelo, así como las condiciones adversas que pueden perjudicar a los cultivos, tales como la acidez excesiva, la salinidad, y la toxicidad de algunos elementos. (León, 2001).

La importancia de los análisis de suelo se considera de una forma muy valiosa debido a los aspectos de las cantidades de los nutrientes que permiten tomar ciertas consideraciones que nos permiten ser precisos en cuanto a las necesidades que el suelo requiere, agregando que los análisis se muestran en la necesidad de poseer una muestra que va diluida en diferentes reactivos o soluciones para hacer las respectivas pruebas o análisis deseadas. (Hardie *et al.*,2012).

4.7.2 Evolución histórica de los métodos de análisis químico de suelos

El campo de estudio en relación al suelo data desde mitad del siglo XX, dando inicio en la parte química derivando teorías de complejo coloidal y propiedades de cargas negativas. En la segunda mitad del siglo se trabajaron síntesis sobre los elementos Aluminio (Jackson,1964), Silicio (McKeague y Cline 1963), Hierro (Segalen1964), Fósforo (1980), Potasio (1985), Hierro (1985), Manganeseo (1988), Metales Pesados (1986). La espectrofotometría se introduce en 1950, la cromatografía 1940-1950.

Desde los primeros tiempos de la Mineralogía ya se diferenciaron, en el suelo, dos tipos de materiales objeto de estudio: la fracción gruesa, mayor de 2 micras de diámetro, y la fracción fina, inferior a dicho tamaño. Si las técnicas de estudio de la primera apenas evolucionaron, utilizándose casi exclusivamente la petrografía microscópica, la interpretación de los resultados empiezan a tener interés cuando se aplica a suelos policíclicos, a índices de fertilidad potencial, en estudios de meteorización y por su utilidad en las clasificaciones de suelos (Bernier V. *et al.*, 2011).

Actualmente se ha cuestionado la importancia concedida a las isothermas de adsorción y a las constantes de intercambio, por insuficientes para conocer de modo preciso los mecanismos implicados en reacciones de superficie como el cambio iónico, la adsorción de iones y moléculas neutras o la isomerización de moléculas orgánicas. Como mucho, han de ser considerados meros indicios, mientras no se demuestre por una vía alternativa el mecanismo

sugerido por estas representaciones y parámetros, vía que deberá de incluir un mayor conocimiento sobre las características químicas de los componentes orgánicos de la Necromasa del suelo, así como la globalidad de los procesos enzimáticos que ocurren en la interfase líquida que de forma correcta denominamos solución del suelo (Ibáñez, 2007).

4.8 Metodologías basadas en Análisis de suelos

4.8.1 Método Bray I y II

Bray I, El método Bray I utiliza un ácido fuerte en la solución de extracción (0,03 M NH_4F + 0,025 M HCl). La elevada cantidad de iones hidrógeno liberados por el HCl aumenta la solubilidad de los fosfatos de calcio, incluidos los fosfatos básicos como la hidroxiapatita. En estas condiciones, la reacción es rápida. Los fosfatos de aluminio y hierro también se solubilizan, pero más lentamente que la hidroxiapatita. Además, los iones H^+ impiden la precipitación del fosfato de calcio. Los iones fluoruro forman complejos con los iones Al^{+3} y Fe^{+3} . El fluoruro favorece la liberación de estos elementos que están asociados al fósforo, y son relativamente insolubles en agua (Nilo *et al.*, 2021).

El método Bray II utiliza un ácido más fuerte en la solución de extracción (0,03 M NH_4F + 0,1 M HCl). La concentración de ácido HCl se aumenta para incluir el P que existe en el suelo como fosfato tricálcico (Bray- Kurtz, 1945).

Ambos métodos utilizan una determinación colorimétrica del fósforo utilizando un complejo de azul de molibdeno. Este complejo es un heteropoliácido. Resulta de la reacción del ion ortofosfato con el ion molibdato en un medio ácido (FAO, 2021).

4.8.2 Método Mehlich I

El (Estándar Operating Procedures) SOP Mehlich-I es adecuado para determinar el fósforo biodisponible en suelos ácidos con baja capacidad de intercambio catiónico ($<10 \text{ cmolc kg}^{-1}$) y bajo contenido de materia orgánica ($<5\%$). El reactivo de extracción Mehlich-I contiene (Ácido Clorhídrico) (HCl) y Ácido Sulfúrico (H_2SO_4) y originalmente se lo conocía como método de doble ácido o método de Carolina del Norte. Los elementos extraídos por Mehlich-I se puede determinar por métodos espectrofotométricamente o mediante espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES). (González Forero & FAO, 2021).

4.8.3 Método Olsen

Este procedimiento es adecuado para suelos calcáreos, alcalinos, neutros y ligeramente ácidos que contienen Fosfato de calcio (Ca_3PO_4), dado que la concentración de calcio en la solución se suprime por la precipitación de Bicarbonato de calcio (CaCO_3), aumentando Concentración de Ion fosfato (PO_4) en solución. Los suelos neutros y ligeramente ácidos (pH 6.0 a 7.0) pueden contener tanto Calcio (Ca) y Aluminio (Al). El extractor Bicarbonato de sodio (NaHCO_3) puede eliminar los fosfatos de Ca y fosfato adsorbido en la superficie de carbonatos de calcio y magnesio junto con fosfatos de Al y se considera la más extractante adecuado para estos suelos. (Bergil *et al.*, 2021).

4.8.4 Método Kjeldahl

Este procedimiento implica la digestión ácida de una muestra de suelo, la destilación del Amoníaco (NH_3) producido y su cuantificación por titulación o colorimetría. El suelo se digiere en ácido sulfúrico concentrado, en presencia de una mezcla catalizadora que permite regular la temperatura de ebullición, hasta su completa disolución y oxidación. El Nitrógeno (N) orgánico contenido en la muestra se oxida a amonio (como sulfato de amonio). El

Amonio (NH_4^+) del digesto se cuantifica mediante la recolección del NH_3 liberado por destilación al vapor del digesto con álcali y se titula con una solución volumétrica de ácido. (Ostinelli *et al.*, 2021).

4.9 Ventajas y limitaciones de los métodos químicos tradicionales

En base a los métodos tradicionales se han constituido a las bases de análisis de suelos durante varias décadas permitiendo avanzar en la comprensión de la fertilidad y en el diseño de diferentes protocolos a nivel mundial, basándose en una fortaleza que son las técnicas de eficiencia, confiabilidad, reproducibilidad a menor tiempo, insumos, calibraciones etc. (Sawyer *et al.*, 1999)

Todos los métodos presentan limitaciones que se deben de considerar en base a su interpretación como condiciones específicas de pH, contenido de arcilla, presencia de carbonatos entre otros, por lo que los rangos alcanzados pueden interpretarse como poco confiables. Es por ello que la estandarización internacional entre diferentes países y laboratorios utilizan metodologías distintas para un mismo procedimiento lo que dificulta su comparación de resultados y construcción de bases de datos globales (Jackson *et al.* 2025).

Tabla 1 Ventajas y limitaciones en base análisis químicos de manera tradicional (Juarez, 2021), Modificada, 2025.

Ventajas	Limitaciones
Mayor Selectividad.	Requieren de más espacio y preparación química especializada.
Aprovechan de buena forma las propiedades químicas.	Métodos relativos: calibración.
Reducción de errores humanos.	Técnicos expertos.
Utiliza cambios de masa o volumen para cuantificar la cantidad, en donde se determina la presencia o la ausencia de un compuesto en partícula.	La sensibilidad y exactitud final dependen de los instrumentos de referencia
Existe amplitud de condiciones experimentales en las que se puede realizar análisis.	La exactitud de resultados va disminuyendo cuando la muestra es menor.
No todos los análisis requieren reacción química.	Límites de tiempo extendidos.

4.10 Importancia de la estandarización en el análisis de suelos

La estandarización de los análisis de suelos asegura que los resultados sean fiables y comparables, permitiendo tomar decisiones precisas sobre los parámetros de fertilización, manejo de suelos entre otros, Esto conlleva a tener una percepción de producción más eficiente y sostenible, optimizando uso de alternativas eficientes y menos contaminantes hacia el suelo, minimizando así el impacto ambiental y corrigiendo deficiencias nutricionales y mejorando la calidad y salud del suelo (Nix, 2024).

4.11 Metodología de análisis Mehlich III

El método Mehlich III es una de las respuestas ante las necesidades de buscar una solución extractora multiparamétrico con más eficiencia y con menor porcentaje de corrosión a comparación de los otros métodos anteriores de Mehlich I y Mehlich II, y como tarea principal de la modificación de la nueva variante de Mehlich se basó en la extracción de macro y micro nutrientes esenciales para mejorar los niveles de solubilización y dicho desarrollo de Mehlich III priorizo la detección de deficiencias de micronutrientes mediante el uso de una solución ácida a bajos niveles de pH (2.5) (Mehlich, 1984).

En los avances hechos por Mehlich III es su aplicabilidad en suelos de amplio espectro de pH, desde suelos ácidos hasta suelos calizos, permitiendo a su vez la sustituir a otras metodologías como Bray, Olsen, Acetato de amonio; por una sola solución, además esta solución ofrece una mejor perceptibilidad de rendimientos (Mylavarapu *et al.*, 2014)

Entre los extractores universales destaca el Mehlich III (Mehlich, 1984) ampliamente usado en Estados Unidos y Canadá, si bien su uso es poco habitual en los países europeos (Buondonn *et al.*, 1992). De todos los métodos anteriores, el Mehlich III altamente correlacionado con la extracción de fósforo. (Oliveira *et al.*, 2015).

El método implica la extracción de nutrientes usando una solución ácida compuesta de cloruro de amonio, ácido acético y ácido nítrico, entre otros componentes. Esta solución ayuda a liberar los nutrientes del suelo para que puedan ser medidos y posteriormente interpretados para tomar decisiones del hombre. Este método es muy popular en América del Norte y también se usa en otras regiones para determinar las necesidades de fertilización de los cultivos en función de la disponibilidad de nutrientes. (INTA,2010).

La mención de Molina (1993), citado por (Cabalceta *et al.*, 2006), menciona que la existencia de disponibilidad de nutrimentos varía según el suelo y sus características químicas por lo

que justifica realizar estudios de correlación, además la solución extractora debe de extraer los nutrimentos en fracciones disponibles como si esta fuese una planta, aunque no se extraiga exactamente la misma cantidad.

La solución extractora multielemental es de amplio rango para la detección de pH en el suelo, y la solución está compuesta por 2 M de Ácido Acético (CH_3COOH , 0,25 M) de Nitrato de Amonio (NH_4NO_3) 0,015 M de Fluoruro de Amonio (NH_4F), 0, 013 M de Ácido Nítrico (HNO_3) y 0,001 M de Etilendiaminotetraacético ácido (EDTA), de igual forma lo que se busca con la extracción es el rendimiento multi elemental de las muestras y no alterar la actividad iónica (Gannini-Kurina *et al.*, 2021).

4.12 Metodología de procedimientos GLOSOLAN

La red mundial de laboratorios de (GLOSOLAN), creada en 2017, en el marco de la Alianza Mundial per el Suelo (AMS), GLOSOLAN facilita la creación de redes y el desarrollo de capacidades a través de la cooperación y el intercambio de información entre laboratorios de suelos con diferentes niveles de experiencia, apoyando en el rendimiento de los laboratorios de suelos mediante el uso de métodos y protocolos estandarizados, y la organización de comparaciones entre laboratorios; de igual forma promueve la armonización de los métodos y datos de análisis de suelos. (FAO, 2020).

4.12.1 Método de Materia Orgánica (Método Walkley-Black- Modificado)

De las formas en las que se puede encontrar el elemento carbono en el suelo, es de la forma química la cual esta se caracteriza por tener mayor interés y es la que incluye los productos en descomposición de forma inmediata en el material orgánico no descompuesto aun y de cierta forma en el humus que se encuentra en el suelo, así de estas dos formas combinadas inorgánicamente y de formas elementales de carbón son excluidas del análisis. (Davis, 2017).

Schollenberger mediante la mezcla de Dicromato de Potasio ($K_2Cr_2O_7$) y Ácido Sulfúrico (H_2SO_4) con el suelo y calentando la mezcla a 175 °C aproximadamente por 2 minutos pudo obtener el ácido crómico. Luego de enfriarse el dicromato no utilizado obtuvo una titulación como una solución de sulfato de amonio ferroso.

Walkley-Black, modificaron la técnica de Schollenberger utilizando el calor producido al reaccionar con la solución de dicromato diluido el ácido sulfúrico concentrado, y poder lograr la oxidación. El 76% de este procedimiento de recuperación de carbono orgánico total fue comparado al 90.4% de recuperación de procedimiento o del método por Schollenberger (Carreira, 2010).

Este método consiste inicialmente en tratar una cantidad pesada de suelo finamente molido con un volumen conocido de solución de dicromato de potasio seguida por a rápida adición de un exceso de ácido sulfúrico concentrado (no menor al 96%) (Milian, 2015).

4.12.2 Método para determinar pH

El pH del suelo se logra determinar de diferentes maneras desde colorantes identificadores, papel tornasol y electrónicos. En este caso se desarrolla el método en relación 1:2.5 (Suelo: Agua) una parte de gramos de suelo por 2.5 de agua destilada y se desarrolla con ayuda electrónica con medidor de pH donde el instrumento se sumerge en partículas de suelo que están en suspensión en agua destilada y entran en contacto con un electrodo de vidrio el cual este tiene la sensibilidad de captar la concentración de iones de hidrógeno (Reeuwijk, L. P, 2002).

4.12.3 Método Bouyoucos para determinar Textura del suelo

El método orienta a medir la densidad en suspensión de las partículas con ayuda de un hidrómetro de Bouyoucos, los gramos de partículas que estén dispersos en la solución de

agua en un tiempo establecido y mientras mayor sea la densidad encontrada en el agua tendrá mayor suspensión el hidrómetro. La muestra de suelo tiende a ser dispersada en el recipiente para que así en el proceso se pueda determinar la textura del suelo por los agentes que la muestra de presenta. (Beretta *et al.*, 2014).

4.12.4 Principales metodologías promovidas por GLOSOLAN

En base a La Red Mundial de Laboratorio de Suelos GLOSOLAN, FAO (2020), contiene diversidad de procesos metodológicos para hacer análisis de suelos en sus diferentes parámetros , algunos de los estudios que destacan por la Red Mundial de Suelos están: pH 1:2.5, Método Walkley- Black titulación y colorimétrico, Método espectrofotómetro de Tyurin, Método de Calcímetro Volumétrico, Método Titrimétrico, Método Bray I, Método Bray II, Método Olsen, Método Kjeldahl, SOP sobre tasa de respiración de suelo, Método Gravimétrico, Conductividad Eléctrica del suelo (suelo/agua 1:5).

4.12.5 Beneficios de estandarización de Metodologías GLOSOLAN

Al realizar análisis de suelos con las metodologías proporcionadas por GLOSOLAN ayuda a referenciar suelos y la comparabilidad entre laboratorios en países, lo que facilita una interpretación de información ayudando en la toma de decisiones para el sector de producción agrícola, seguridad alimentaria y medidas de sostenibilidad ambiental; permitiendo un crecimiento de salud de suelo (FAO,2015).

Según la perspectiva que proporciona GLOSOLAN (2021), lo que permite una comparabilidad de datos permitiendo que la información de suelos sea comparable a nivel internacional, facilitando tendencias de análisis. Mejora de la toma de decisiones; en los casos de recomendaciones, siembras y manejo de cultivos. Identificación de contaminantes; facilita la identificación de las alteraciones de los minerales en los suelos a analizar. Permiten el

fortalecimiento de las capacidades técnicas de los laboratorios y mejoramiento de la calidad de resultados.

4.13 Comparación de metodologías en la determinación de macronutrientes

Aplicando lo mencionado por Dongyu (2011), la determinación de macronutrientes en el suelo es debidamente necesario armar planes o procedimientos de fertilización eficientes y sostenibles, sin embargo, a lo largo del tiempo se han desarrollado múltiples procedimientos químicos y cada una de ellas diseñadas para responder a condiciones edáficas particulares desde parámetros como pH, textura, mineralogía y presencia de carbonatos.

La necesidad de hacer comparaciones entre metodologías surge por varias razones como: Variabilidad de suelos; donde un método u otro puede ser mejor adecuado a suelos ácidos (Bray I), pero no hace inferencia en suelos alcalinos (donde se recomienda usar Olsen o Mehlich III) (MAGDOFF *et al.*, 2021).

4.14 Análisis de suelos en perspectiva de gestores en recursos naturales

Es aspecto fundamental la parte de realizar análisis de suelos, ya que este nos permite realizar recolección de muestras de suelos las cuales estas son procesadas y estas generan resultados por lo cual nos dan un banco de información en base a la salud de suelo, nutrientes, fertilidad, niveles de contaminación. (Nix, 2024).

De igual manera en la actualidad se realza de forma monumental el accionar a priorizar los recursos naturales; enfocándose desde la calidad de aire, recursos agua, energías verdes, preservación de suelos, entre otros. Generalmente se realizan planes a mediano y largo plazo donde se busca destacar el buen uso de herramientas y practicas reflejadas en campo, donde se incluyen proyectos de forma individual y de forma social buscando el bien común, al tener la precepción de mejorar las condiciones básicas que van desde el uso de suelo, manejo y

reincorporación y adición de minerales y nutrientes va un enfoque diferente a los aspectos de pensamiento de décadas pasadas (Iturri,1999).

Además, el desarrollo de la sociedad actualmente no solo tiene un enfoque del ámbito político y económico ahora se apuesta de promover el cambio mediante la inversión económica al sector ambiental, para desarrollar proyectos los cuales no solo contraiga beneficios de forma regional, sino que conlleve beneficios de forma mundial.

V. MATERIALES Y METODOS

5.1. Descripción del lugar de la investigación

El trabajo de investigación se desarrolló en el Laboratorio de suelos Agrícolas PhD. Elio Durón Andino de la Universidad Nacional de Agricultura (UNAG), en el municipio de Catacamas, Olancho, Honduras C.A. Con coordenadas 14.829212° N, 85.841381° E, a 450 metros sobre el nivel del mar (msnm).

5.1.1 Población Muestreal en base al desarrollo de la investigación

El trabajo de investigación se desarrolló con una cantidad de 126 muestras que se seleccionaron siendo existentes y acondicionadas dentro del laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Agricultura (UNAG), que representaban áreas productivas de diferentes puntos del país.

5.1.2 Condiciones de muestra para la investigación

Las muestras que se seleccionaron se encontraban pretratadas en condiciones secado, moliendas y tamizadas dejándolas en partículas de suelo de un tamaño ideal de 2 milímetros (mm) ideales para realizar el pesado de la misma, posteriormente realizar las diferentes pruebas que correspondieron dentro del laboratorio.

5.2 Procedimiento Analítico Mehlich III

El método según (Oliveira, J. *et al* 2015). Mehlich III es un procedimiento químico ampliamente utilizado en la ciencia del suelo para evaluar la disponibilidad de nutrientes en suelos, es especialmente útil para determinar la concentración de nutrientes esenciales potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), Fosforo (P) y algunos micronutrientes (como hierro, manganeso, zinc y cobre). Este método es una versión mejorada del método Mehlich I y se adapta mejor a suelos con diferentes propiedades químicas y físicas.

5.2.1 Procedimiento para extraer nutrientes con Mehlich III

De las muestras ya existentes del banco de muestras del laboratorio, se procedió a tomar una muestra de suelo para realizar el pesado de la misma con ayuda de una balanza y se pesó una cantidad específica de suelo, 5 gramos, luego se coloca en el Erlenmeyer de 150 ml.

Una vez pesadas las muestras se procedió a agregarles la solución de Mehlich III a un pH 2.5; compuesta por Nitrato de Amonio (NH_4NO_3), Ácido Nítrico (HNO_3), Ácido Acético (CH_3COOH) y Ácido Etilendiaminotetraacético EDTA ($\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}_8$), midiendo 50 ml de solución extractora y agregada a cada Erlenmeyer para así colocar los Erlenmeyer en el agitador vaivén de BIOBASE a un tiempo de 30 minutos a 200 revoluciones por minuto (rpm), después de pasar en el agitador se procedió a realizar el filtrado con ayuda de bases junto con embudos y papel filtro Whatman N° 42 para así almacenar el extracto en envases oscuros de 50 ml.

5.2.2 Procedimiento para determinar Potasio, Calcio y Magnesio con Mehlich III

Luego del proceso de extracción (ver 5.2.1) se preparan en tubos Falcón de 15 ml; para determinar Mg y Ca se colocó 1 ml de extracto y 9 ml Cloruro de Potasio 0.1%. para determinar elemento K se colocó 1ml de extracto y 9 ml de Cloruro de Sodio 0.1%. Los

elementos son determinadas en Espectrofotómetro de Absorción Atómica (EAA) novAA 800 de Analytik jena, recordando siempre que al respectivo equipo se realizó una curva de calibración aceptando un r^2 mínimo de 0.99.

5.2.3 Procedimiento para determinar Fósforo con Mehlich III

Para el análisis de fósforo se prepararon las muestras en recipientes de plástico con capacidad de 30 ml donde se agregó 2 ml del filtrado (ver 5.2.1) junto con 25 ml de solución la cual se compone por Molibdato de amonio ($(\text{NH}_4) \text{Mo}_7 \text{O}_{24}$) y Tartrato doble de antimonio de potasio ($\text{K}(\text{SbO}_2) \text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$), luego se dejó reposar 60 minutos.

Una vez pasado el tiempo establecido se procede a calibrar el Espectrofotómetro de UV-visible Analytik Jena, SPECORD/210 PLUS; con soluciones estándares con concentraciones de 0,2,4,8,10 y 12 partes por millón (ppm) para ver la concentración del elemento mediante la ayuda del equipo y realizando una curva de calibración aceptando un $r^2 = 0.99$.

5.2.4 Procedimientos analíticos GLOSOLAN

5.2.4.1 Procedimiento para extraer las Bases intercambiables

Según la metodología GLOSOLAN, (2022), este procedimiento describe el proceso para la determinación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y las bases intercambiables (calcio, magnesio, potasio) en el suelo utilizando acetato de amonio 1N a pH 7. El método proporciona una estimación de las bases intercambiables disponibles para las plantas.

Se comienza pesando 5 gramos de suelos con ayuda de la balanza analítica para luego transferir el suelo a un Erlenmeyer de 125 ml, luego se adicionaron 33 ml de solución de

Acetato de Amonio de pH 7 (NH_4 , CH_3COO), y se colocan los Erlenmeyer en el agitador vaivén BIOBASE durante 15 minutos a 200 revoluciones por minuto (rpm).

5.2.4.2 Determinación de Potasio, Calcio y Magnesio método GLOSOLAN.

Luego del proceso de extracción (ver 5.2.4.1) se preparan en tubos Falcón de 15 ml; para determinar Mg y Ca se colocó 1 ml de extracto y 9 ml de Cloruro de Potasio 0.1% para determinar elemento K se colocó 1 ml de extracto y 9 ml de Cloruro de Sodio 0.1%. Los elementos son determinadas en Espectrofotómetro de Absorción Atómica (EAA) 800 de Analytik jena, recordando siempre que el respectivo equipo se realizó una curva de calibración aceptando un r^2 mínimo de 0.99.

5.2.4.3 Procedimiento analítico para fósforo método GLOSOLAN

Guiándose mediante la metodología Bray II proporcionada por Nilo & Bergi (2021), en colaboración con (FAO, 2021). El Fosforo (P), es uno de los elementos no móvil en los suelos, pero que puede afectar su nivel de persistencia ya sea por el pH, las temperaturas, la humedad.

Se inicio pesando 2 gramos de muestra y se agregó 14 ml de solución extractora; compuesta por Fluoruro de Amonio (NH_4F 0,03 M) y Ácido Clorhídrico (HCl 0,1 M), luego se colocaron en el agitador vaivén BIOBASE durante 1 minuto y se continuo con su filtración con papel Whatman N°42 y almacenar en frascos oscuros.

Del filtrado del procedimiento anterior se extrae 2 ml y se adicionan 25 ml de reactivo que contiene combinación de Molibdato de amonio ($(\text{NH}_4) \text{Mo}_7 \text{O}_{24}$) más Tartrato doble de antimonio de potasio ($\text{K}(\text{SbO}_2) \text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$), Ácido Sulfúrico (H_2SO_4) una vez todo junto de tomará 20 ml por cada 1000 ml y Ácido Ascórbico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$), tomando 10 ml por cada 1000 ml de solución a preparar, posteriormente se deja reposar por 60 minutos.

Una vez pasado el tiempo establecido se procedió a calibrar el Espectrofotómetro de UV-visible de Analytik Jena, SPECORD/210 PLUS; con soluciones estándares 0, 2, 4, 8, 10 y 12 ppm para ver la concentración del elemento mediante la ayuda del equipo y realizando una curva de calibración aceptando un $r^2 = 0.99$

5.2.5 Determinación de materia orgánica (Método Walkley-Black- Modificado)

Se pesa 1 gramo de suelo de las muestras y de la misma forma pesar dos muestras control con ayuda de una balanza analítica y se traspasan a un Erlenmeyer de 250 ml procedió a colocar las muestras dentro de la campana de extracción de gases. Se agregó 20 ml de Ácido Sulfúrico concentrado (H_2SO_4) y 10 ml de Dicromato de Potasio ($K_2Cr_2O_7$ a 0.167 M) incluyendo de igual forma dos blancos (muestras sin suelo), luego de agregar los reactivos; se dejó reposar 30 minutos y después se agregó 200 ml de agua desionizada.

Pasado el tiempo se procedió a realizar la titulación de las muestras la cual se realizó con ayuda de un indicador de Heroína 0.025 N ($C_{36}H_{24}FeN_6O_4S$) el cual se agregan 5 gotas con ayuda de un gotero y se agrega el reactivo de Sulfato Ferroso de Amonio a una bureta. Una vez hecho los pasos anteriores con ayuda de un Agitador magnético y de un magneto se comienza a agitar el contenido que está dentro de los Erlenmeyer para empezar la titulación.

5.2.6 Determinación de pH relación 1; 2.5

Para determinar el pH en agua relación 1:2.5 (suelo: agua). Se pesaron 10 gramos de suelo Beaker de 50 ml, y se agregaron 25 ml de agua destilada y con ayuda de un agitador de vidrio/plástico se agito el contenido y repetimos este paso cada 20 minutos hasta completar 1 hora.

Al completar el tiempo se procedió a calibrar el equipo con ayuda de soluciones tampón pH 4, pH 7 y pH 10 y se comenzaron a realizar las lecturas, las cuales se realizaron a las 1, 2 y 3 horas de reposo, esto con el propósito de tener una lectura estable.

5.2.7. Determinación de textura (Método Boyucos)

Se pesaron 60 gr de suelo dentro de un Beaker de 120 ml y se llevan al horno durante 12-24 horas. Luego se pesaron 50.0 gramos de suelo seco.

Seguido se realizó la dispersión química las muestras se agregaron 10 ml de Hexametáfosfato de Sodio (NaPO_3)₆ y 100 ml de agua destilada y se deja reposar de 12-16 horas. Luego se procedió a la dispersión física colocando las muestras en batidora durante 10 minutos y después ser colocadas en probetas volumétricas y llevar a volumen de 1000 ml con agua destilada.

Se procedió a agitar la muestra durante 1 minuto y se tomó la lectura del hidrómetro y termómetro a los 40 segundos y 2 horas.

5.3 VARIABLES

5.3.1 Determinación de Bases Intercambiables con método Mehlich III

Una vez desarrollado el paso (ver 5.2.2) el equipo de Espectrofotómetro de Absorción Atómica (EAA) novAA 800 de Analytik Jena, dio resultados directos partes por millón (ppm) que contiene la muestra de los elementos K, Ca, Mg.

Para determinar la concentración de las Bases intercambiables se utilizó el dato directo que proporciona el equipo multiplicado por el factor de dilución que se obtienen por la

metodología trabajada, en el caso de Mehlich III el factor de disolución es de 10; proveniente de pesar 5 gr de suelo y dividido por los 50 ml de solución extractora utilizada.

5.3.2 Determinación de Fósforo método Mehlich III

Desarrollado el paso (ver 5.2.3) el equipo Espectrofotómetro de UV- visible de Analytik Jena, SPECORD/210 PLUS, dio resultados directos expresados en partes por millón (ppm) que contienen las muestras de fosforo.

Para determinar la concentración de fósforo se utilizó el dato directo que facilita el equipo multiplicado por el factor de disolución que se obtiene por la metodología trabajada, en el caso de Mehlich el factor es de 10, que proviene de pesar 5 gramos de suelo y dividido por los 50 ml de solución extractora utilizada.

5.3.3 Determinación de Bases Intercambiables con Método GLOSOLAN

Concluido el procedimiento (ver 5.2.4.2) el equipo de Espectrofotómetro de Absorción Atómica (EAA) novAA 800 de Analytik Jena, dio resultados directos en partes por millón (ppm) que contienen las muestras de los Elementos K, Ca, Mg.

Para determinar las concentraciones de las Bases Intercambiables se utilizó el dato directo que proporciona el equipo multiplicado por el factor de dilución que se obtienen por la metodología trabajada, en caso de GLOSOLAN el factor de disolución es de 6.6; que proviene de 5 gramos de suelo y dividido por los 33ml de solución extractora utilizada.

5.3.4 Determinación de Fósforo con Método GLOSOLAN

Terminado el procedimiento en el paso (ver 5.2.4.3) el equipo Espectrofotómetro de UV-visible de Analytik Jena, SPECORD/210 PLUS; dio resultados directos expresados en partes por millón (ppm) que contienen las muestras de Fósforo.

Para conocer la concentración de fósforo se utilizó el dato directo que facilita el equipo multiplicado por el factor de disolución que se obtienen por dicha metodología trabajada, en el caso de GLOSOLAN el factor es de 7, que proviene de pesar 2 gramos de suelo y dividido por los 14 ml de solución extractora.

5.3.5 Determinación de Materia Orgánica del Suelo

En cada una de las muestras que se desarrollaron en la metodología para la determinación de materia orgánica, del suelo (ver 5.2.5). se obtuvieron los datos de los mililitros gastados para titular la muestra y el blanco, luego se calculó aplicando la siguiente formula:

$$\% \text{ CO} = \frac{(\text{ml blanco} - \text{ml muestra})(N)(0.003)(100)}{\text{peso de muestra}} \times 1.3$$

En donde:

CO = porcentaje de carbono orgánico.

ml blanco = mililitros gastados en la titulación del blanco.

ml muestra = mililitros gastados en la titulación de la muestra.

N = Normalidad del sulfato ferroso amoniacal.

0.003 = miliequivalente en gramo del carbono.

1.3 = factor de corrección.

$$\% \textbf{MO} = (\% \textbf{C}) (1.724)$$

En donde:

% **MO** = porcentaje de materia orgánica.

% **C** = porcentaje de Carbono.

1.724 = factor de determinación.

5.3.6 Determinación de pH

Se realizó la medición detallada; según el procedimiento (ver 5.2.6) de cada muestra utilizando un medidor de pH, previamente calibrado con soluciones concentradas de pH 4, pH7 y pH10. La lectura reflejada por parte del equipo es registrada y una vez que el equipo este estabilizado con el electrodo sumergido en la muestra dará la respuesta directa del nivel de pH de cada muestra.

5.3.7 Calculo de la Textura del suelo

Terminado el procedimiento (ver 5.2.7) Se comenzó corrigiendo las lecturas de temperaturas pasando de grados Celsius (°C) a grados Fahrenheit (°F), y sumándoles el valor nuevo de temperatura dado en la Tabla 1 (Figura 1), de igual forma a las lecturas obtenidas con el Hidrómetro.

Para la determinación del porcentaje de cada parte que conforma el suelo (Arena, Limo y Arcilla) se lleva a cabo aplicando una fórmula específica para cada una de ellas la cual se desarrolla a continuación:

$$\% \textbf{Arcilla} = \left[\left(\frac{2 \text{ da Lectura Corrigida}}{\text{peso de ma muestra}} \right) \times 100 \right]$$

$$\% \text{Arena} = 100 - \left[\left(\frac{1 \text{ era Lectura Corrigida}}{\text{peso de ma muestra}} \right) \times 100 \right]$$

$$\% \text{ limo} = 100 - \% \text{ arcilla} - \% \text{ arena}$$

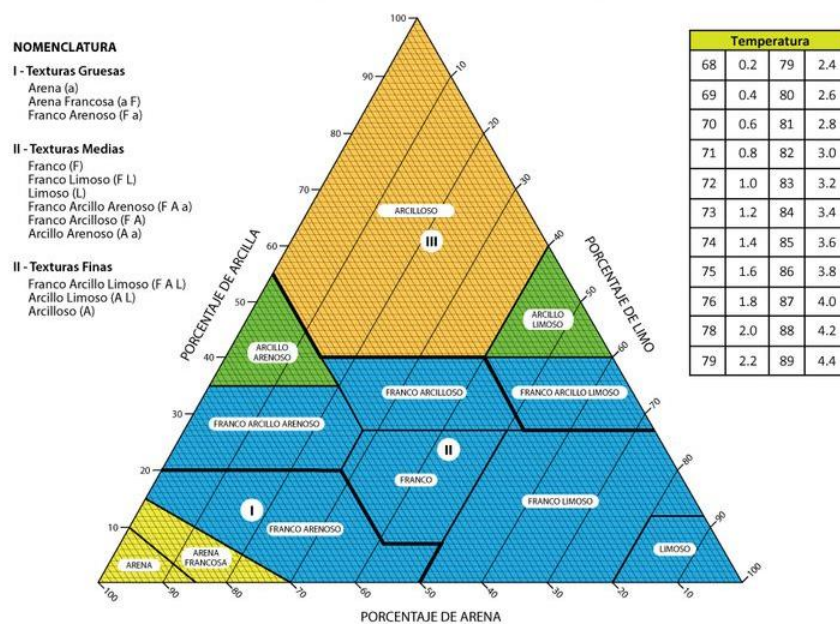


Figura 1 Carta para la Determinación de Texturas de suelos "Copiado de U.S. Department of Agriculture Bureau of Plant Insduty, Soils and Agricultural Engineering

6. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

En la investigación se combinaron diferentes tipos de análisis estadísticos integrando desde la parte experimental y descriptiva; en donde los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis Boxplot mediante el Software R studio para identificar las muestras Outlier.

Eliminadas las muestras Outliers que generaban distorsión, se realizó nuevamente el grafico de correlación y regresión para así obtener un r^2 más estable. Seguidamente se ejecutó una

matriz de correlación con el objetivo de correlacionar los resultados existentes por las metodologías desarrolladas junto con las variables para ver la relación que existe entre sí.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Análisis Bloxplot por Metodología Mehlich III y Metodología GLOSOLAN

Este análisis resume la información recolectada a través de medidas de tendencia central y de limitantes de dispersión, facilitando la observación de valores que se desvían significativamente de los rangos intercuartílicos. Y a medida se identifiquen los valores atípicos procede a su exclusión que contribuye a reducir la heterogeneidad de los datos permitiendo así resultados más robustos y representativos para el análisis.

6.2 Comparación descriptiva de macronutrientes determinados por método Mehlich III y GLOSOLAN

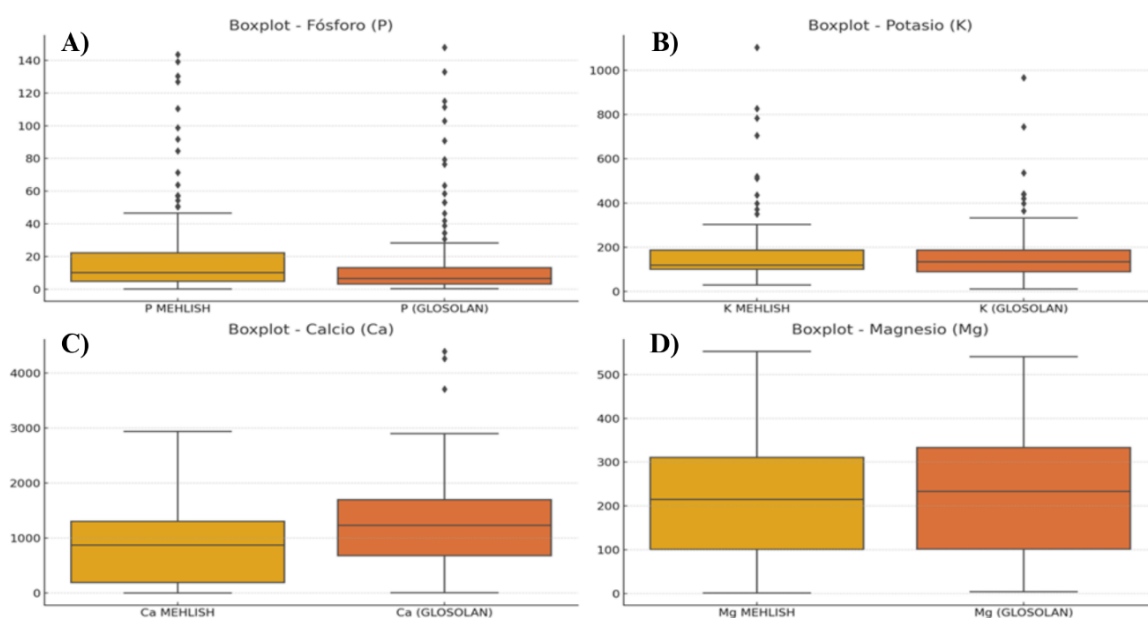


Figura 2 Boxplot de Nutrientes de suelo por medio de la metodología Mehlich III y metodología GLOSOLAN en los macronutrientes P, Ca, K, Mg

6.2.1 Comparación descriptiva de disponibilidad de Fosforo

En el análisis de la Figura 2;A), se observa la distribución de los datos de la disponibilidad de fósforo para el método Mehlich III, tiende a expresar una mediana más alta que en el método GLOSOLAN y puede reportar un nivel mayor en la presencia extraíble de fósforo. Concordando con (Macnack *et al.*, 2017), que esto puede deberse a que la solución de Mehlich III puede ser un poco más agresiva o más sensible en su capacidad de detectar y de extraer el elemento al momento de interactuar la solución extractante con las muestras de análisis.

De igual manera, ambas metodologías expresan valores atípicos, especialmente GLOSOLAN tiende a valores más elevados fuera de los límites de valores atípicos en comparación de Mehlich III; dejando en claro que GLOSOLAN mantiene un restringido límite en los niveles de concentración de datos; manteniendo así un margen de datos más concentrados. Simões Mendonça (2005), menciona que en el caso de fósforo con Mehlich tiende a obtener buenas respuestas de interacción a pesar que el método tiene a usarse más a suelos neutros y alcalinos.

6.2.2 Comparación descriptiva de disponibilidad de Potasio

Con respecto a la Figura 2; B), el gráfico correspondiente al potasio, comparando los métodos de extracción Mehlich III y GLOSOLAN. Ambos procedimientos muestran medianas similares, lo que indica cierta coincidencia en los valores centrales obtenidos. Sin embargo, el método GLOSOLAN evidencia una mayor variabilidad en el rango intercuartílico, lo cual podría atribuirse a una menor eficiencia en la extracción de potasio o a una mayor sensibilidad frente a variaciones en las características del suelo.

De acuerdo con Lenssen *et al.*, (2013), esta variabilidad puede estar influenciada por factores edáficos como la mineralogía del suelo y su capacidad de intercambio catiónico (CIC), los cuales afectan directamente la disponibilidad del potasio. Por otro lado, el método Mehlich III tiende a reportar valores más extremos, lo que podría indicar una mayor capacidad extractiva para este elemento, especialmente en suelos con alta disponibilidad de potasio.

6.2.3 Comparación descriptiva de disponibilidad de Calcio

Con respecto a la Figura 2; C), muestra que la distribución de los datos correspondientes al contenido de calcio en las muestras de suelo, trabajadas mediante las metodologías GLOSOLAN y Mehlich III. Ambas técnicas presentan medianas similares, lo que sugiere una proximidad en los valores centrales. No obstante, el método GLOSOLAN exhibe una mayor dispersión, evidenciada por la presencia de valores atípicos (outliers) por encima de los límites superiores del rango intercuartílico.

Este comportamiento podría indicar que la metodología GLOSOLAN es más sensible a concentraciones elevadas de calcio en ciertos suelos, captando variaciones que el método Mehlich III tiende a suavizar. Sin embargo, según (Zhang *et al.*, 2014), la solución Mehlich III se caracteriza por ser altamente eficiente y tener la capacidad de solubilizar cationes intercambiables, como el calcio, debido a su composición química multielemental.

Es importante señalar que la presencia de valores extremos puede deberse tanto a la sensibilidad del método como a factores naturales del suelo.

6.2.4 Comparación descriptiva de disponibilidad de Magnesio

La comparación reflejada en la Figura 2; D), se presenta el análisis estadístico del contenido de magnesio en las muestras de suelo, evidenciando que ambos métodos extractantes, Mehlich III y GLOSOLAN, muestran medianas muy similares. Esta coincidencia indica una

alta coherencia entre los métodos, además de la ausencia de valores atípicos (outliers), lo cual respalda su comparabilidad y validez para la evaluación de magnesio en los suelos analizados.

De igual forma, la alta concordancia observada sugiere una baja variabilidad en el comportamiento de este elemento en los suelos evaluados. Esta estabilidad podría atribuirse a la menor movilidad del magnesio o al hecho de que ambos métodos extraen una fracción similar del elemento disponible (Gavlak *et al.*, 2005). No obstante, es fundamental considerar que la sensibilidad y respuesta de cada método puede variar en función de las características físico-químicas del suelo.

6.3 Análisis de Regresión por Metodología Mehlich III y Metodología GLOSOLAN

Los análisis de regresión desarrollados en el proceso de investigación nos proporcionan una explicación en base a que se puede predecir y evaluar coherencia metodología o experimental, convirtiéndose en una herramienta indispensable para comparaciones entre metodologías que evalúan diversidad de datos obtenidos permitiendo así una garantía en aplicabilidad de resultados en los dos diferentes contextos, a continuación se derivan los diferentes análisis de regresión para los diferentes macroelementos.

6.3.1 Análisis de regresión de Fosforo en Método Mehlich III vs Metodología GLOSOLAN

En el análisis de regresión lineal, se comparan las metodologías Mehlich III y metodologías GLOSOLAN en la (Figura 3). Los valores obtenidos por Mehlich III presentan mayor incremento en comparación a valores obtenidos por GLOSOLAN, Expresando una ecuación lineal de $Y = -1.05 + 0.87X$, destacando que, cuando Mehlich III proporciona un valor el método de GLOSOLAN incrementa 0.87 mg/kg, dado el caso que Mehlich proporcione un intercepto negativo la diferencia en GLOSOLAN sería ligeramente negativa; según Reyes *et*

al., (2021) la existencia de un intercepto negativo no significa que el método pierda validez, si no que los valores bajos de Fósforo extraído por Mehlich III puede haber diferencias estadísticas en base a la sensibilidad de solubilización del reactivo empleado por GLOSOLAN . De igual forma el coeficiente de determinación (r^2) mostró un valor de relación positivamente fuerte 0.86, lo que indica que el modelo explica el 86% de la variabilidad y que ambos métodos producen resultados muy consistentes y que es posible predecir el resultado independiente el método utilizado.

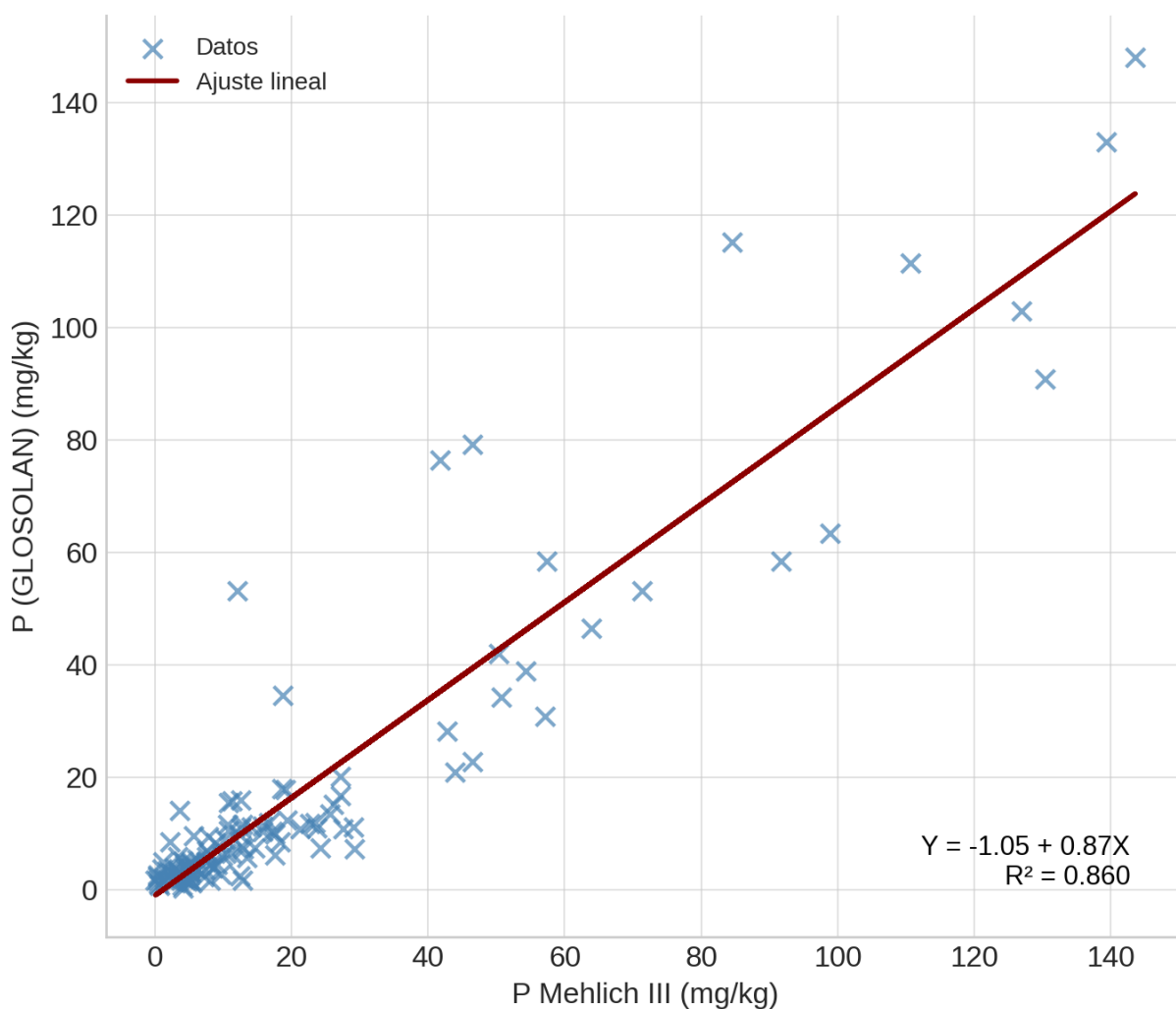


Figura 3 Regresión lineal de Fósforo (P) por método Mehlich III versus metodología GLOSOLAN

6.3.2 Análisis de Regresión de Potasio en Metodología Mehlich III versus Metodología GLOSOLAN

En el análisis de regresión del elemento Potasio por la metodología GLOSOLAN y el método Mehlich III, que se refleja en la (Figura 4), muestra una tendencia de valores en menor concentración de GLOSOLAN en comparación a Mehlich III, bajo la línea de identidad que muestra el grafico de regresión, provocando que la dispersión de puntos no se presente de forma uniforme a lo largo del gráfico.

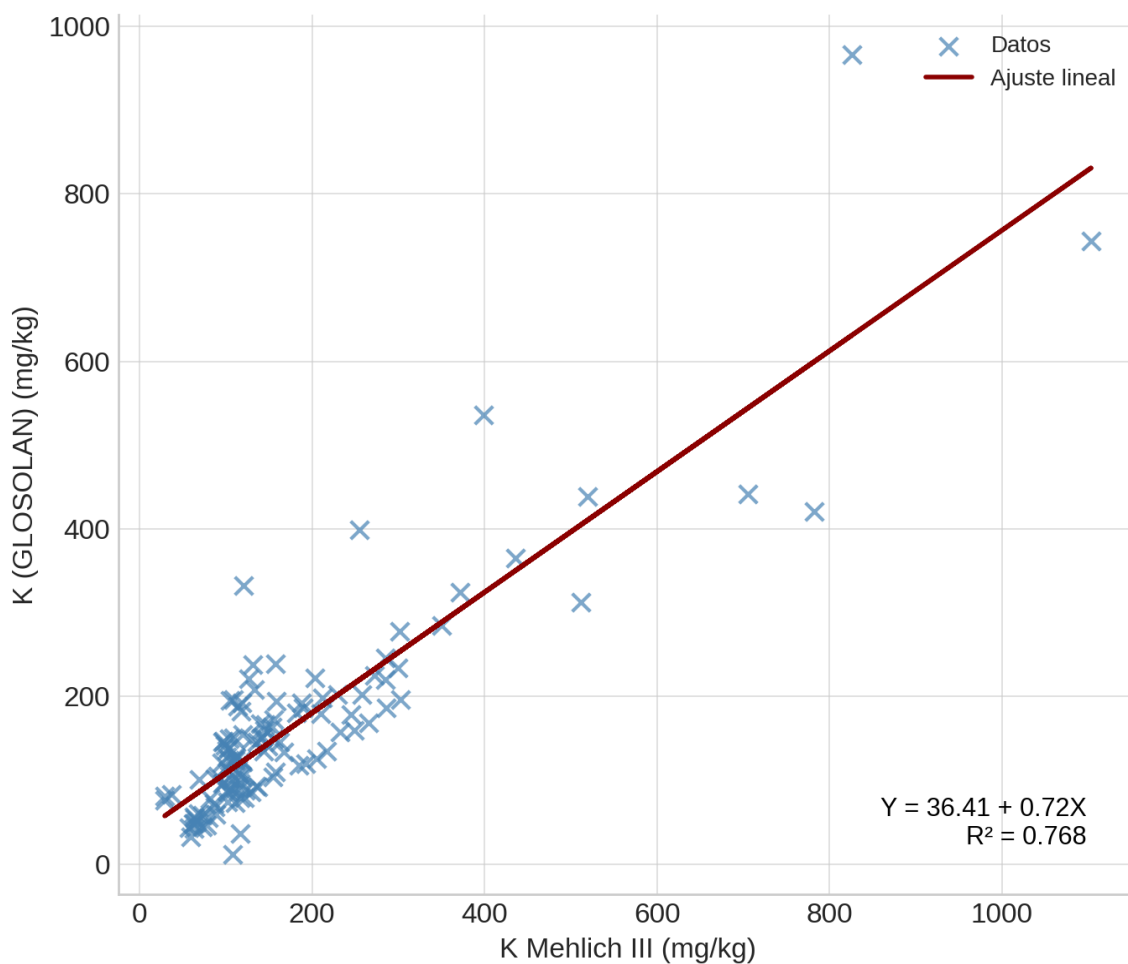


Figura 4 Regresión lineal de Potasio (K) por método Mehlich III versus metodología GLOSOLAN

En el análisis de regresión lineal en la Figura 4, entre método Mehlich III y método GLOSOLAN evidencia una asociación estadística positiva evidenciada en la ecuación de modelo $y = 36.41 + 0.72x$ indicando que los valores estimados por método de Mehlich III sean proporcionales a GLOSOLAN y estarían aumentando 0.72 mg/kg, en la ecuación también observamos un intercepto, donde el método GLOSOLAN adopta la medición de 36.41 mg/kg.

El $r^2 = 0.768$ determina así una alta capacidad de predecir con respecto al método Mehlich III a GLOSOLAN o viceversa, dando un grado de concordancia que sugiere la relación de ambos procedimientos ayuda a determinar la predicción de un método de otro con un 76%, marcando una probabilidad mínima de error en los datos que existen entre el método GLOSOLAN y el método Mehlich, en este caso dando un 24% de diferencias proporcionando a Mehlich III una estimación moderada y GLOSOLAN podría estar subestimando los resultados en base a la composición química. Comprobando lo mencionado según la (FAO, 2020), menciona que la diferencia observada es esperable y metodológicamente válida.

6.3.3 Análisis de Regresión de Calcio en metodología Mehlich III versus metodología GLOSOLAN

En la regresión lineal de Calcio se observa una distribución no uniforme de los datos a lo largo de los dos ejes mostrándose con una gran proporción de dispersión, en la ecuación de regresión $y = 504.34 + 0.92x$, indica que por cada mg/kg aumenta Ca medido por el método Mehlich III, el Ca medido por GLOSOLAN estaría aumentando 0.92 mg/kg partiendo desde el valor de 504.34 mg/kg cuando Mehlich III estaría equivaliendo a cero.

El coeficiente de determinación de $r^2 = 0.452$ refleja que el 45.2 % de la variabilidad del modelo lineal está explicada, sugiriendo que la comparación de los métodos para este macroelemento

expresan una compatibilidad baja, concordando con el autor Zhang *et al.*, (2014), haciendo mención en el caso de la metodología de GLOSOLAN tenga mayor afinidad por formas de calcio más solubles (como Ca^{2+} libre), mientras que Mehlich III puede tener mayor eficiencia de solubilización y que las variables en función del pH y contenido de materia orgánica no tendrían tanta influencia en este caso, considerando el estado agronómico del suelo.

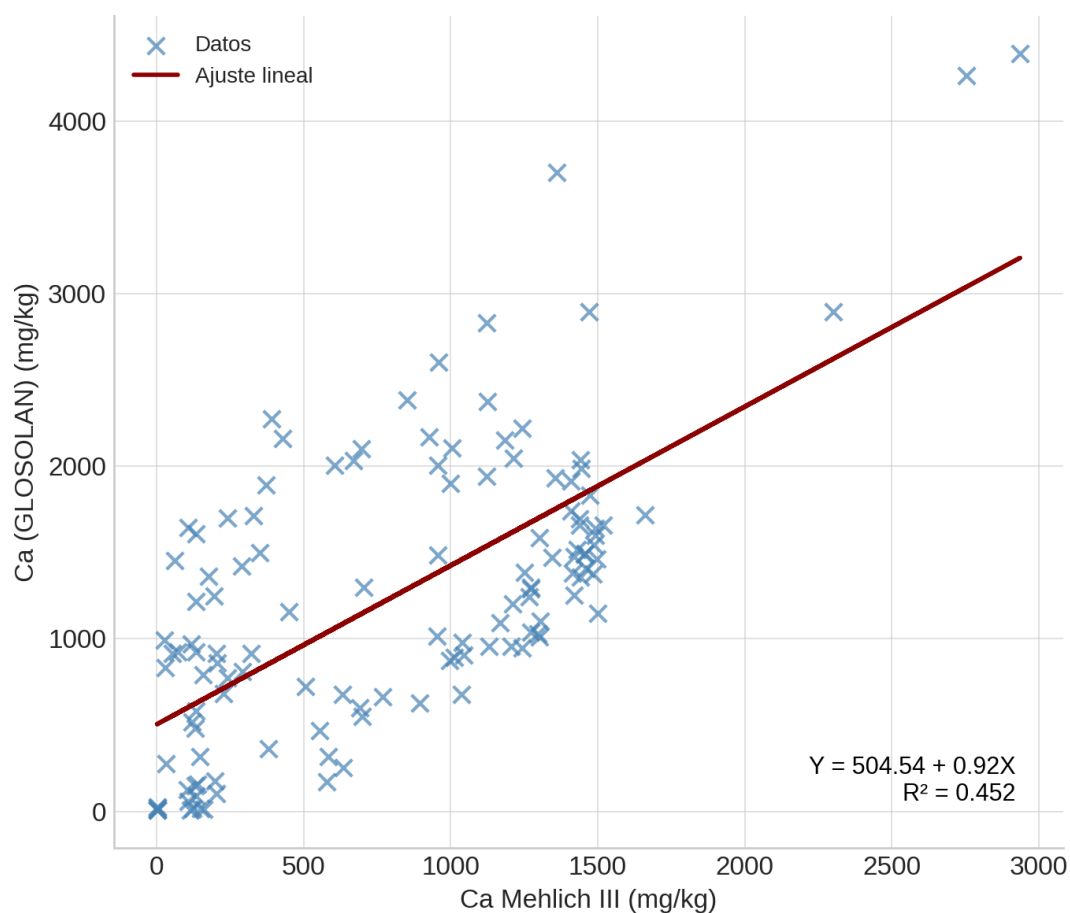


Figura 5 Regresión Lineal de Calcio (C) por método Mehlich III versus método GLOSOLAN

6.3.4 Análisis de Regresión de Magnesio en metodología Mehlich III versus metodología GLOSOLAN

En la Figura 6, se observa que la nube de dispersión de los puntos es de forma más uniforme, se evidencia que ambos métodos presentan un modelo de ecuación de $y=33.03+0.96x$, indicando que por cada unidad de Magnesio detectada por la metodología Mehlich III el método de GLOSOLAN registra un incremento de 0.96 unidades, partiendo desde el valor de 33.03 mg/kg cuando el valor medido por Mehlich III es cero; y estudios comparativos de Alvarez *et al.*,(2016) indica que las pendientes cercanas a uno pueden esconder diferencias sistemáticas debidas a la química de los extractantes, GLOSOLAN utiliza medidas estandarizadas que pueden captar fracciones diferentes de magnesio en comparación a Mehlich III, especialmente en suelo con saturaciones de bases o condiciones ácidas. De igual forma el $r^2= 0.762$ refleja gran parte de las variaciones del modelo lineal, evidenciando una predicción aceptable entre ambos métodos.

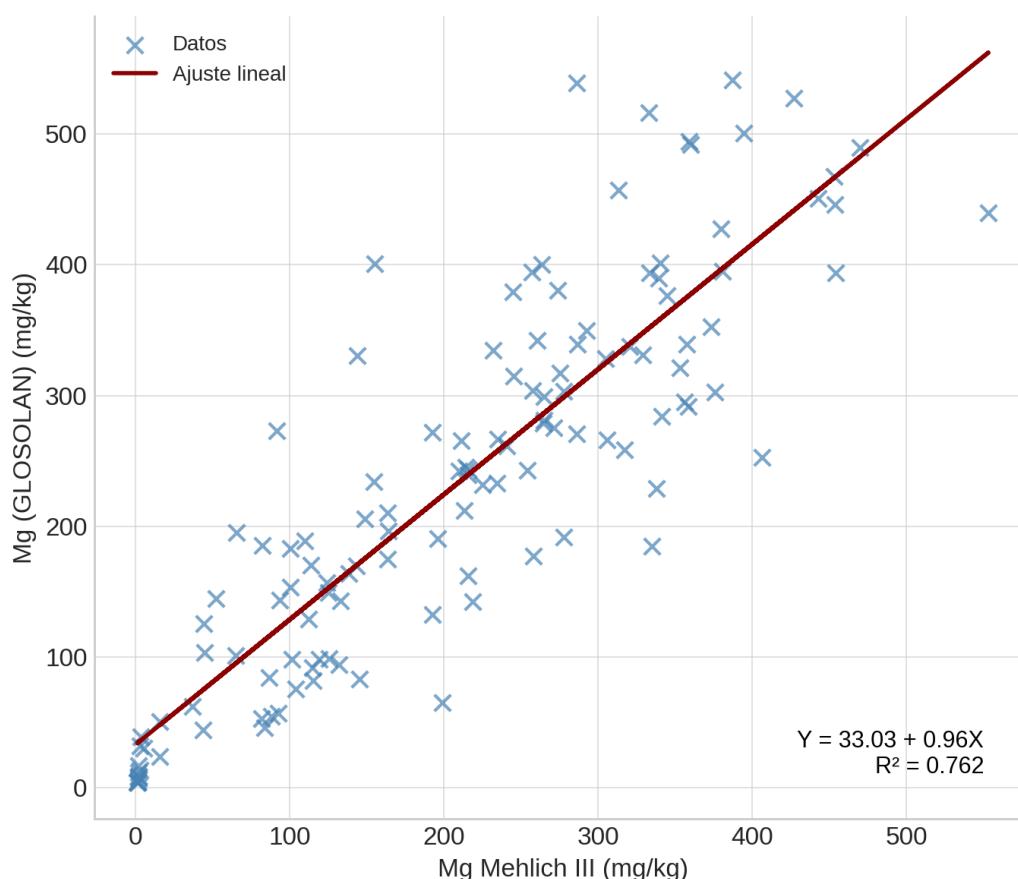


Figura 6 Regresión Lineal de Magnesio (Mg) por método Mehlich III versus método GLOSOLAN

6.4. Correlaciones entre metodología Mehlich III y GLOSOLAN en proporción a las variables

La tabla de coeficientes o matriz de correlación Pearson muestra los diferentes coeficientes correlacionados entre las variables o metodologías utilizadas para dicho análisis, con el objetivo de identificar las relaciones lineales entre las variables que se centran reflejadas en la matriz (Figura 7) para así detectar correlaciones, permitiendo así conocer todos los coeficientes en un mismo plano; siendo así, se desarrolló la matriz de correlación para determinar el grado de compatibilidad de ambas metodologías Mehlich III y metodologías GLOSOLAN

La correlación del elemento fósforo por ambos métodos con nivel de muy alta significancia (***) de 93 %. Lo que sugiere que existe conexión directa y consistente entre ambos métodos para la determinación de Fósforo por los procedimientos Mehlich III y GLOSOLAN, lo que también se tendría en consideración que en cada forma de extracción de fósforo puede medir en diferentes formas y la acidez que presenten las soluciones utilizadas; Mallarino, (2015), resalta que la combinación de dos métodos analíticos se debe de considerar las transformaciones que sufren en el desarrollo del procedimiento para así realizar las interpretaciones.

La correlación de Calcio por método GLOSOLAN y método Mehlich III muestra una correlación muy alta significativa (***) de 67% en ambas mediciones de los métodos, aunque no de manera perfecta, la diferencia puede deberse a factores externos como errores metodológicos, el grado de solubilización para extraer el Calcio soluble o el manejo agronómico, a su vez Rogers *et al.*, (2019), menciona que debe de existir consideración en cuanto al manejo o las practicas que ha recibido el suelo por prácticas agrícolas, el pH y la relación de Capacidad de intercambio catiónico.

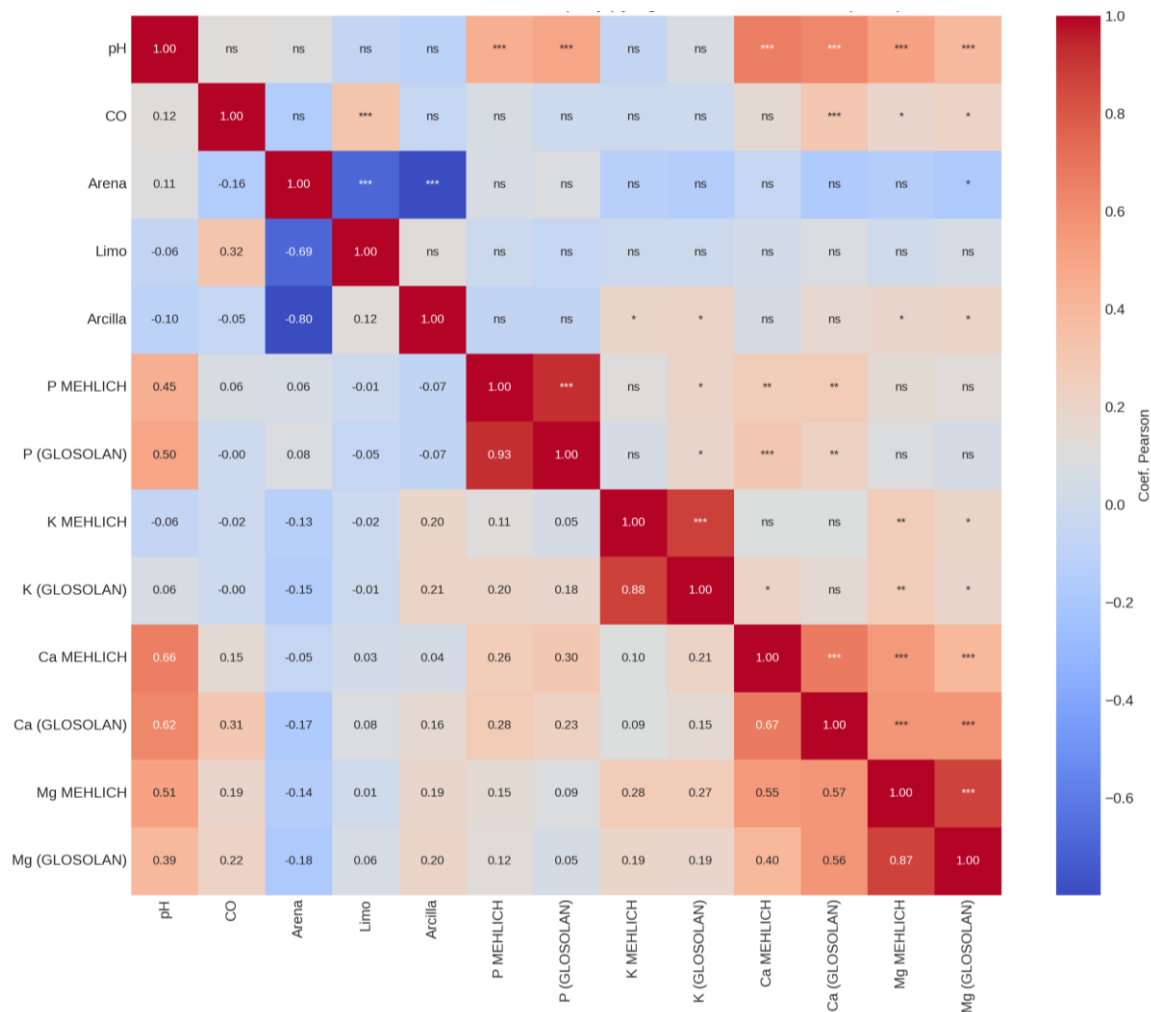


Figura 7 Matriz de correlación de parámetros físico-químicos de suelos analizados.

El elemento Potasio mostró una correlación muy alta en significancia (***) de 88% (Figura 7) reflejando los valores obtenidos por parte de ambas metodologías cuantifican la concentración de Potasio de manera muy paralela; asumiendo que los procesos de extracción de ambos métodos lo vuelven confiable para cuantificar las partes por millón existentes en el suelo; de igual forma Demiss M. *et al.*, (2020), reporta que aunque exista una correlación estable siempre existe pequeñas diferencias en la eficiencia extractiva presente en cada método.

El magnesio presenta una correlación de muy alta significancia (***) de 87% entre Mehlich III y GLOSOLAN presenciando que ambos métodos pueden cuantificar las fracciones intercambiables casi iguales. La alta consistencia puede deberse a que el Magnesio puede ser dependiente del pH como el elemento de Fósforo, ni se ve tan influido por los carbonatos como de Calcio. Y las diferencias menores entre ambas metodologías pueden predecir uno del otro. Y de acuerdo con el estudio realizado en Kansas, EUA por Rutter et al., (2021) que en el caso de Mehlich III y el método de Acetato de amonio encontraron una relación casi lineal de 1:1 entre los valores extraído por ambas metodologías independiente del pH y los porcentajes de materia orgánica evaluados.

La correlación de pH con las texturas (arena, limo y arcillas) se representan como asociados no significativos (ns) con las fracciones texturales, sugiriendo que el pH no está ligado a la granulometría del suelo y que este comportamiento puede explicar que el pH es una propiedad netamente química, determinada por saturación de las bases o de presencia de carbonatos. Kumar *et al.*, (2020) relata que los niveles de pH van de factores de manejo y de fenómenos naturales contribuyen a dicha variabilidad. Del mismo modo FAO (2020), menciona que; “la variabilidad local de pH deriva de fertilizaciones y prácticas agrícolas que se realizan en campo que son atribuidas a un vínculo directo y universal textural.

En la Figura 7, la correlación entre pH y Carbono Orgánico (CO) se muestra de manera baja y no significativa (ns) por lo que no hay una relación estadística fuerte entre ellos, lo cual puede decir que el pH no se relaciona o depende directamente de los niveles de carbono orgánico, ya que el material orgánico depende de gran actividad microbológica y si no hay un pH estable este mismo afecta la actividad microbiana, por eso , aunque el pH y el CO estén relacionados en teoría, en la práctica esta relación puede ser débil o compleja requiriendo otras formas de análisis. Coincidiendo con el autor Sharma *et al.*, (2019) expresando que las relaciones de pH y los materiales orgánicos no suelen ser lineales y suelen ser dependientes de la textura, y de la capacidad de intercambio catiónico.

La matriz refleja la relación significativa positiva entre el pH y los macronutrientes especialmente entre Calcio (0.66, ***), Magnesio (0.39, ***), Fósforo (0.50, ***) pero en el caso de Potasio (0.06, ns) puede deberse a la movilidad del elemento lo que puede llevar a la lixiviación, sugiriendo que para que exista más presencia de potasio dependería de la fertilización y de la textura de suelo que del pH, expresa (Rosen *et al.*, 2005).

VII. CONCLUSIONES

En los análisis comparativos por ambas metodologías como Mehlich III vs GLOSOLAN se evidenció que son técnicamente válidos, en donde los resultados reflejan que si pueden llegar a predecirse uno del otro en el caso de Fósforo, Potasio y Magnesio proporcionando confiabilidad para desarrollar diagnósticos de fertilidad de análisis de suelo.

Los análisis de comparación entre la metodología Mehlich III y GLOSOLAN en los macronutrientes Fósforo, Potasio, Magnesio presentaron r^2 moderados, sugiriendo confiabilidad de los resultados en base al elemento; en el caso del elemento Calcio se presentó un r^2 bajo indicando que estas metodologías difieren en la capacidad de disolución para extracción del análisis considerando una sobreestimación o una subestimación.

La matriz de correlación desarrollada en el estudio evidenció que las propiedades edáficas como pH y MO tiene una relación directa con la disponibilidad de los macronutrientes, confirmando la necesidad de considerar variables físico-químicas en análisis de suelo.

VIII. RECOMENDACIONES

Considerar la implementación de más procedimientos GLOSOLAN para realizar estudios de referencia; para así realizar otras diferentes comparaciones entre diferentes puntos del país para así armonizar resultados.

Contemplar el uso de ambas metodologías con Mehlich III y GLOSOLAN para validar la presencia de los Macronutrientes en el suelo y así realizar recomendaciones en base a las deficiencias que presente el suelo.

Promover la capacidad técnica de la inversión y procedimientos de metodología GLOSOLAN garantizando así la reproducibilidad y confiabilidad de resultados y llegar a ser más estandarizada en diferentes laboratorios que aún no cuenten con el uso de los procedimientos GLOSOLAN.

Considerar extender el estudio de comparación de metodologías en diferentes zonas a nivel nacional con el fin de ampliar el campo de resultados en los diferentes tipos suelos y realizar una clasificación de ellos.

IX. BIBLIOGRAFIA

- Alva, AK 1993. "Comparación de Mehlich 3, Mehlich 1, bicarbonato de amonio-DTPA, acetato de amonio 1,0 M y cloruro de amonio 0,2 M para la extracción de calcio, magnesio, fósforo y potasio para una amplia gama de suelos". *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 24(7–8), 603–612.
- Alvarenga, G; FAO. 2024. En alianza SAG- CIAT- FAO: Especialistas agrícolas realizan levantamiento de muestras de suelo en Honduras (en línea). Ciencia y Tecnología Agropecuaria SAG-DICTA (014-2024):Secretaría de Agricultura y Ganadería. Disponible en <https://dicta.gob.hn/files/En-alianza-SAG--CIAT--FAO-Especialistas-agricolas-realizan-levantamiento-de-muestras-de-suelo-en-Honduras.pdf>.
- Alvarez, R., Taboada, M., & García, F. (2016). Métodos de extracción de nutrientes y su relación con la disponibilidad para cultivos. *Agrociencia*, 50(2), 129–142.
- Atlas, Ronald M. y Bartha, Richard. Ecología microbiana y microbiología ambiental. 4º edición, Addison Wesley, 2001.
- Barbaro; A, L; Karlanian; Mata, A. 2019. Importancia del pH y la Conductividad Eléctrica (CE) en los Sustratos para Plantas. Importancia del pH y la Conductividad Eléctrica (CE) en los Sustratos para Plantas. (en línea). 11 P. s.l., s.e. Disponible en <https://www.argentina.gob.ar/inta>.
- Basset, C; Najm, MA; Daccache, A. 2023. Cómo afecta la estructura del suelo a la infiltración de agua (en línea, sitio web). Consultado 7 ene. 2025. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016719872200263X#bib25>.

Berdegue Sacristán, J. 2023. Nutrición de los suelos, clave para la agricultura (en línea, sitio web).

Disponible en <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/nutricion-de-los-suelos-clave-para-la-agricultura>.

Beretta, A; Silbermann, A; Paladino, L; Torres, D. (2014). Análisis de la textura del suelo mediante

un hidrómetro: modificación del método de Bouyoucos (en línea). s.l., s.e. DOI:

<https://doi.org/10.4067/S0718-16202014000200013>.

Bergil, B; Nilo, G. 2021. Standard operating procedure for soil available phosphorus Olsen method

(en línea, sitio web). Disponible en

<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/d69a78fc-3ccd-4a9d-a77a-7e729be66c4a/content>.

Bernier V, R; Undurraga, P. 2011. ANÁLISIS DE SUELO. , , METODOLOGIA E

INTERPRETACION (en línea, sitio web). Disponible en

<https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/502afa97-61aa-4112-92e8-60dfcbceb34e/content>.

Borrás, C. 2018. La Importancia de los Suelos en las Actividades Productivas (en línea, sitio web).

Disponible en [https://tecnosolucionescr.net/blog/52-la-importancia-de-los-suelos-en-las-actividades-](https://tecnosolucionescr.net/blog/52-la-importancia-de-los-suelos-en-las-actividades-productivas#:~:text=El%20an%C3%A1lisis%20de%20suelos%20es,dosis%20de%20nutrientes%20a%20aplicar)

[productivas#:~:text=El%20an%C3%A1lisis%20de%20suelos%20es,dosis%20de%20nutrientes%20a%20aplicar](https://tecnosolucionescr.net/blog/52-la-importancia-de-los-suelos-en-las-actividades-productivas#:~:text=El%20an%C3%A1lisis%20de%20suelos%20es,dosis%20de%20nutrientes%20a%20aplicar).

Bray, R.H. and L.T. Kurtz. 1945. Determination of Total Organic and Available Forms of Phosphorus in Soils Sci. 59:39-45

Brunel, N; Segue, O. 2011. EFECTOS DE LA EROSIÓN EN LAS PROPIEDADES DEL SUELO.

Agro Sur. s.l., s.e., vol.Vol. 39.

- Buchman et al. The nature and properties of soil. 2001. Thirteen edition. Prentice may Publisher.
- BUONDONNO, A .; COPPLA , E .; FELLECA , D .; VIOLANTE , R , 1992 . Prueba comparativa de fertilidad del suelo: 1 .Ecuación de conversión entre Olsen y Mehlich h3 como extractantes de fósforo para 120 suelos del Sur Italia . Commun. Soil Sci. Plant Anal, 23, 699-716.
- Cabalceta, G; Molina, E. 2006. NIVELES CRÍTICOS DE NUTRIMENTOS EN SUELOS DE COSTA RICA UTILIZANDO LA SOLUCIÓN EXTRACTORA MEHLICH 3. s.l., s.e., vol.30. p. 31-44. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/436/43630203.pdf>
- Castellanos, J. Z. 2000. Manual de Interpretación de Análisis de Suelos, Aguas. Ed. Intagri. Gto., México. 186 p
- Castellanos, J.Z. 2000. Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas. Segunda edición. Intagri, S.C. Guanajuato, México. 226 p
- Cenicaña. 2016. Importancia del agua en la nutrición de los cultivos (en línea, sitio web). Disponible en <https://www.cenicana.org/importancia-del-agua-en-la-nutricion-de-los-cultivos/>.
- CHABLA CARRILLO, JE. 2022. EVOLUCIÓN GEOESPACIAL DE LOS MACRONUTRIENTES EN EL SUELO POR EFECTO DEL FERTIRRIEGO EN EL CULTIVO DE BANANO (en línea). s.l., Universida Tecnologica de Machala. Disponible en <https://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/19713/1/TTUACA-2022-IA-DE00003.pdf>.
- Cherlinka, V. 2018. Fertilidad del suelo: cómo medirla y mejorarla (en línea, sitio web). Disponible en <https://eos.com/es/blog/fertilidad-del-suelo/>.
- Cherlinka, V. 2024. Análisis De Suelo: Muestreo Y Lectura Del Resultado. (en línea, sitio web). Disponible en <https://eos.com/es/blog/analisis-de-suelo/>.

- CLARK, CA. 2023. El importante papel de la textura del suelo en el agua (en línea, sitio web). Disponible en <https://cropsandsoils.extension.wisc.edu/articles/the-important-role-of-soil-texture-on-water/>
- Cooper, L; Abi-Ghanem, R. 2017. Los micronutrientes son la clave para mejorar la producción. (en línea). HUMAGRO . Disponible en <https://humagro.com/wp-content/uploads/2017/07/Los-micronutrientes-son-la-clave-para-mejorar-la-producci%C3%B3n-White-Paper-HG-SP.pdf>.
- Dalzell, HW; Biddlestone, AJ; Gray, KR; Thuraiarajan, K; Servicio de Recursos, Manejo y Conservación de Suelos , Dirección de Fomento de Tierras y Aguas, FAO. 1991. Manejo del suelo: producción y uso del composte en ambientes tropicales y subtropicales. s.l., s.e.
- Demiss, M., Beyene, S. y Kidanu, S. Comparación de extractantes de suelo y medición de reflectancia espectral para la estimación del potasio disponible en algunos suelos etíopes. *Eurasian Soil Sc.* 53, 1100–1109 (2020). <https://doi.org/10.1134/S1064229320080049>
- Dongyu, Q. 2011. ¿Por qué una Alianza Mundial por el Suelo? (en línea, sitio web). Disponible en <https://www.fao.org/global-soil-partnership/about/es/>.
- FAO. (2015). Redes Nacionales de Laboratorios de Suelo (en línea). s.l., s.e. Disponible en <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/a31f4fab-5b6f-4957-b72b-2fd51ffb35/content>.
- FAO. (2020). *Global Soil Laboratory Network (GLOSOLAN): Standards and harmonization progress report*.
- FAO. 2020. GLOSOLAN - Red Mundial de Laboratorios de Suelo. (en línea, sitio web). Disponible en <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca4183es>.

FAO. 2020. *The State of Food and Agriculture 2020: Overcoming water challenges in agriculture*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Roma. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6e2d2772-5976-4671-9e2a-0b2ad87cb646/content>.

FAO. 2021. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (en línea, sitio web). Disponible en <https://www.fao.org/global-soil-partnership/glosolan-old/repository/standard-operating-procedures/en/>.

FAO. 2021. Standard Operating Procedure for soil available Phosphorus - Mehlich I Method (en línea, sitio web). Disponible en <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/d6504b9a-6dfc-4479-8ec1-048cb2287505/content>.

Ferrando, MG; Barbazán, MM; García, FO; Mallarino, AP. 2020. Comparación del acetato de amonio, Mehlich 3 y tetrafenilboro de sodio como extractantes para evaluar el potasio disponible en los cultivos. (en línea). TAYLOR AND FRANCIS GROUP Volumen- 51(Número 8). Disponible en <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00103624.2020.1744625>.

Figueroa Bonilla, AE. 1999. Metodología de Análisis de Suelos del Laboratorio de la Funda Hondureña de Investigación Agrícola (FHIA). Tesis de Pregrado. s.l., Escuela Nacional de Agricultura.

FRYE, W.W., EBELHAR, S.A., MURDOCK, L.W., BLEVINS, R.L. 1982. Soil erosion effects on properties and productivity of two Kentucky soil.

GANNINI-KURINA, F; BALZARINI, M; KORITSCHONER, J; RAMPOLDI, A; HANG, S. (2021). MODELOS PARA LA CONVERSIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE FE, MN, CU Y ZN ENTRE LOS MÉTODOS MEHLICH-3 Y DTPA-TEA EN SUELOS DE CÓRDOBA (en línea). s.l., s.e. Disponible en <https://www.ojs.suelos.org.ar/index.php/cds/article/view/658>.

GANNINI-KURINA, F; BALZARINI, M; KORITSCHONER, J; RAMPOLDI, A; HANG, S. (2021). MODELOS PARA LA CONVERSIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE FE, MN, CU Y ZN ENTRE LOS MÉTODOS MEHLICH-3 Y DTPA-TEA EN SUELOS DE CÓRDOBA.

Gavlak, R. G., Horneck, D. A., & Miller, R. O. (2005). *Soil, Plant and Water Reference Methods for the Western Region* (3rd ed.). WREP 125.

GLOSOLAN. (2022). Procedimiento operativo estándar para la capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiables (en línea). s.l., GLOSOLAN Comité Técnico. Disponible en <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/cfc7409a-422e-4daf-86e0-6364f3d5d0fa/content>.

GLOSOLAN. 2021. Laboratorio FUSADES entra a red para el cuidado de los suelos (en línea). s.l., s.e. Disponible en [https://fusades.org/contenido/laboratorio-fusades-entra-a-red-para-el-cuidado-de-los-suelos#:~:text=La%20Global%20Soil%20Laboratory%20Network,Mundial%20de%20Alimentos%20\(FAO\)](https://fusades.org/contenido/laboratorio-fusades-entra-a-red-para-el-cuidado-de-los-suelos#:~:text=La%20Global%20Soil%20Laboratory%20Network,Mundial%20de%20Alimentos%20(FAO)).

González Forero, R; FAO. 2021. Standard operating procedure for soil available phosphorus - Mehlich I Method. (en línea, sitio web). Disponible en

<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/d6504b9a-6dfc-4479-8ec1-048cb2287505/content>.

Gutierrez, F; Pérez, D; O, F; Saldivar; Martínez. 2012. Compactación Inducida por el Rodaje de Tractores Agrícolas en un Vertisol. (en línea, sitio web). Disponible en <https://www.intagri.com/articulos/suelos/propiedades-fisicas-del-suelo-y-el-crecimiento-de-las-plantas>.

Hardie, M; Doyle, R. 2012. Medición de la salinidad del suelo. suelo (en línea, sitio web). Disponible en <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22895776/>.

Hernandez Jimenez, A; Irán Borjoques, J; Morell Planes, F; Cabrera Rodríguez, A; Osvaldo García, M; García Paredes, JD; Madueño Molina, A; Najera Gonzales, O. 2010. Fundamentos de la estructura de suelos tropicales. Primera Edición. s.l., s.e.

HILLEL, D. 1998. Environmental soil physics. Academic Press. San Diego. U.S.A. 771 p.

Ibáñez, JJ. 2007. Historia de la Ciencia del Suelo 10ª Parte. Los aportes de la Química a la Ciencias del Suelo. (en línea, sitio web). Disponible en <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2007/05/14/65521>.

Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). (2010). *Análisis de suelos y su interpretación*

Iturri, MP. 1999. Los recursos de agua y suelo para la agricultura y el desarrollo rural. Área de Ciencia, Tecnología y Recursos Naturales. N°11, 1999(35-50).

Javed, A; Ali, E; Binte Afzal, K; Asma, O; Riaz, S. 2022. Factors Affecting Soil Fertility, and Biodiversity Responsible for Soil Fertility (en línea, sitio web). Disponible en <https://www-fortunejournals-com.translate.goog/articles/soil-fertility-factors-affecting-soil-fertility-and->

biodiversity-responsible-for-soil-

fertility.html?_x_tr_sch=http&_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc.

Juarez Garces, CL. 2019. Analisis instrumental Ventajas y desventajas de los metodos analiticos.

Diapositivas (en línea, sitio web). Disponible en

<https://es.scribd.com/document/593789168/Ventajas-y-Desventajas-de-los-Metodos->

Analiticos.

Karlton, E.; Lemenih, M.; Tolera, M. 2013. *Comparing soil chemical methods for assessing nutrient*

availability in agricultural soils of Ethiopia. Swedish University of Agricultural Sciences

(SLU), Department of Soil and Environment. Uppsala, Suecia.

Kluepfel, M; Lippert, B. 2016. Cambiando el pH del suelo (en línea, sitio web). Disponible

en <https://hgic.clemson.edu/factsheet/cambiando-el-ph-del-suelo/>.

Kumar, M.; Jain, D.; Saifi, Z.; Krishnananda, S. D. (2025). *Predicting Soil Macronutrient Levels: A*

Machine Learning Approach Models Trained on pH, Conductivity, and Average Power of

Acid-Base Solutions. *arXiv*. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/2504.04138>.

León, L.A. 2001. Características y Eficiencia de Uso de Fertilizantes en el Trópico. IFDC.FHIA.

La Lima, Cortes, Honduras.

León, L.A. 2001. Evaluación de la fertilidad del suelo. In Fertilidad de suelos: diagnóstico y control,

2 ed. por F.S.Silva, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá, Colombia. p. 155-

183. Mahc, Mexico.

Macholdt, J; Glerup Gyldengren, J; Diamantopoulos, E; Styczen, ME. 2021. ¿Cómo afectará la

gestión agronómica futura, dependiente del clima, al riesgo de rendimiento de los sistemas

de cultivo de trigo? Un estudio de caso regional del este de Dinamarca. (en línea, sitio

web). Disponible en <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-agricultural->

science/article/how-will-future-climate-depending-agronomic-management-impact-the-yield-risk-of-wheat-cropping-systems-a-regional-case-study-of-eastern-denmark/A187321B86C513B1713901E9D1456DE5.

Macnack, N; Khim Chim, B; Arnall, B; Amedy, B. (2017). Fertilización basada en el concepto de suficiencia, acumulación y mantenimiento (en línea). s.l., s.e. Disponible en <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/fertilization-based-on-sufficiency-build-up-and-maintenance-concept.html>.

Macronutrientes | AEFA - Asociación Española de Fabricantes de Agronutrientes. (en línea, sitio web). Disponible en <https://aeфа-agronutrientes.org/macronutrientes>.

MAGDOFF, F; VAN ES, H; USDA; Sustainable Agriculture Research & Education. 2021.

BUILDING SOILS FOR BETTER CROPS ECOLOGICAL MANAGEMENT FOR HEALTHY SOILS (en línea). s.l., s.e., vol.Cap. 21. Disponible en <https://www.sare.org/wp-content/uploads/Building-Soils-for-Better-Crops.pdf>.

Mallarino, A. 2015. Interpretación de los resultados de la prueba de fósforo en suelo Mehlich-3 ICP (en línea). s.l., IOWA STATE UNIVERSITY. . Disponible en <https://crops.extension.iastate.edu/encyclopedia/interpreting-results-mehlich-3-icp-soil-phosphorus-test?>

Manuel Reveles Hernández, R. V. (diciembre de 2009). Libro técnico No. 11 "Tecnología para cultivar ajo en Zacatecas". Calera, Zacate

Mehlich A. 1984. Mehlich-3 soil test extractant: a modification of Mehlich-2 extractant. Commun Soil Sci Plant Anal 15(12):1409–16.

Mend, R., & López, A. (2007). *Evaluación del fósforo disponible mediante tres métodos en distintos suelos*

- Milian Gay, L. (2015). INFLUENCIA DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO EN EL SECUESTRO DE CARBONO. BIOCHAR, UNA ESTRATEGIA POTENCIAL. (en línea). s.l., s.e. Consultado 4 nov. 2024. Disponible en <https://docta.ucm.es/rest/api/core/bitstreams/84d1a4ae-ee0e-41ca-b5d6-4659d4d7dd88/content>.
- MOLINA E. 1993. Calibración de métodos de análisis de cobre, zinc y manganeso disponible en Ultisoles, Vertisoles, Inceptisoles y Andisoles de Costa Rica. Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 146 p
- Molina, E. y Meléndez, G. 2002. Tabla de interpretación de análisis de suelos. Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. Mimeo.
- Mylavarapu, R; Obreza, T; Morgan, K; Hochmuth, G; Nair, VN; Wright, A. 2014. Extracción de nutrientes del suelo con el reactivo Mehlich-3 para suelos ácidos-minerales de Florida (en línea, sitio web). Disponible en https://edis.ifas.ufl.edu/publication/SS620?utm_source.
- Mylavarapu, RS 2009. "Pruebas diagnósticas de nutrientes". *HortTech*. 20: 19–22.
- Nilo, G. 2019. Procedimiento operativo estándar para el análisis de carbono orgánico del suelo Walkley-Black (en línea, sitio web). Disponible en <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/3e255ff1-5a67-4d60-af9d-a3a37cb16a1f/content>.
- Nilo, G; Bergi, B. 2021. Standard operating procedure for soil available phosphorus (en línea, sitio web). Disponible en <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/1e4693b1-9ee2-4e29-91d9-e2f310a8c384/content>.
- Nilo, G; Bergil, B; FAO. 2021. Standard operating procedure for soil available phosphorus Bray I and Bray II method. (en línea, sitio web). Disponible en

<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/1e4693b1-9ee2-4e29-91d9-e2f310a8c384/content>.

Nix, J. 2024. La importancia del análisis del suelo en la planificación agrícola (en línea, sitio web). Disponible en <https://biomemakers.com/es/blog/la-importancia-del-analisis-del-suelo-en-la-planificacion-agricola#:~:text=La%20planificaci%C3%B3n%20de%20la%20pretemporada,suelo%2C%20pueden%20mejorar%20sus%20cosechas>.

Oliveira, J., y colaboradores. (2015). *Pérdida de disponibilidad y niveles críticos de fósforo Mehlich 3 en suelos no calcáreos de Asturias*.

Ortega, R. 2022. La estructura del suelo es un indicador que afecta directamente la producción (en línea, sitio web). Disponible en <https://mundoagro.cl/la-estructura-del-suelo-es-un-indicador-que-afecta-directamente-la-produccion/>.

Ostinelli, M; FAO. 2021. Standard operating procedure for soil nitrogen Kjeldahl method. (en línea, sitio web). Disponible en <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/17a0e476-f796-4608-a869-295a367c0b56/content>.

Parra, A. 2024. Universidad de Concepción: pionera en espectroscopía de suelos y desarrollo sostenible. (en línea, sitio web). Disponible en <https://www.cienciaenchile.cl/universidad-de-concepcion-pionera-en-espectroscopia-de-suelos-y-desarrollo-sostenible/>.

Plaster, Edward J. La ciencia del suelo y su manejo. Ed. Paraninfo, 2012.

Portal de Suelos de la FAO | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura 2024.

- Reeuwijk, L. P, V; FAO. 2002. PROCEDURES FOR SOIL ANALYSIS (en línea). 6ª edition. s.l., s.e. Disponible en https://www.isric.org/sites/default/files/ISRIC_TechPap09.pdf.
- Reyes, J., Durán, R., & Castellanos, J. (2021). Comparación de métodos de extracción de fósforo en suelos agrícolas de origen volcánico. *Agrociencia*, 55(3), 215–229.
- Rogers, CW; Dari, B; Schroeder, KL. 2019. Comparison of Soil-Test Extractants for Potassium, Calcium, Magnesium, Sulfur, and Micronutrients in Idaho Soils (en línea). *Agrosystems Geosciences & Environment* 2(1):1-9. DOI: <https://doi.org/10.2134/age2019.08.0067>.
- Romero López, J; Gil Martínez, A; Pallarés Ranz, J. 2020. Evaluación del potencial del carbón para su uso como fertilizante con micronutrientes para el suelo. (en línea). Tesis Doctoral. s.l., UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA. Disponible en <https://core.ac.uk/download/pdf/392385079.pdf> (en línea). s.l., s.e. Disponible en https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/1663/Ver_Documento_1663.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Rosen, C. J., & Eliason, R. (2005). *Nutrient Management for Commercial Fruit & Vegetable Crops in Minnesota*. Universidad de Minnesota Extension. Recuperado 10 de septiembre de 2025, de <https://extension.umn.edu/phosphorus-and-potassium/potassium-crop-production>
- Rutter, EB; Ruiz Díaz, DA; Hargrave, L. 2021. Comparación del calcio y magnesio extraíbles con mehlich-3 y acetato de amonio en suelos de Kansas (en línea). s.l., Universidad Estatal de Kansas. Disponible en https://newprairiepress.org/kaesrr/vol7/iss8/3/?utm_source
- Salamanca Solís, CR; Baquero Peñuela, JE. (2014). NUTRICIÓN Y FERTILIZACIÓN CON MACRO Y MICRONUTRIENTES. s.l., s.e.
- Sarabia, C. 2022. Productos nutricionales importancia en los cultivos. (en línea, sitio web). Disponible en <https://sarabia.eu/productos/nutricionales/macronutrientes/>.

- Sawyer, JE; Mallarino, AP. (1999). Differentiating and Understanding the Mehlich 3, Bray, and Olsen Soil Phosphorus Tests (en línea). s.l., Iowa State University. Disponible en https://www.agronext.iastate.edu/soilfertility/info/mnconf11_22_99.pdf?utm_source.
- SHARMA, R.; SINGH, S.; SHARMA, R.; SHARMA, S.; SHARMA, R. *Perfil de distribución de micronutrientes y sus interrelaciones con propiedades físico-químicas del suelo en el distrito de Kangra, Himachal Pradesh, India. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, [s.l.], v. 8, n. 9, p. 1234–1242, 2019. Disponible en: <https://www.ijcmas.com>. Accedido el: 20 ago. 2025.
- Simões Mendonça Horta Monteiro, MDC. 2005. La disponibilidad de fósforo evaluada por el método de Olsen en suelos ácidos por el método de Olsen en suelos ácidos de Portugal: significado agronómico y ambiental Portugal: significado agronómico y ambiental. s.l., Universidad de Córdoba Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes.
- Singh Farmaha, B; Caughman, W; Park LGP, D. 2020. Estrategias de muestreo de suelos basadas en la agricultura de precisión. <https://lgpress.clemson.edu/publication/precision-agriculture-based-soil-sampling-strategies/>.
- Standard Operating Procedure for soil available Phosphorus Bray I and Bray II method 2021 (en línea, sitio web). Disponible en <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/1e4693b1-9ee2-4e29-91d9-e2f310a8c384/content>.
- Tecnología, P. LOS MACRONUTRIENTES Y SU RELACIÓN EN EL SUELO (en línea, sitio web). Disponible en <https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/los-macronutrientes-y-su-relacion-en-el->

suelo?srsId=AfmBOooK68SpZyRC2ZPnztFnOTXENjnpCWjopz9MOH3bw6ZySXhgcQJM.

Tejerina, W; Gaspar, L. 2018. Efecto del exceso de humedad en suelos (nutrientes) (en línea, sitio web). Disponible en <https://www.amauta.ag/cultivando/efecto-del-exceso-de-humedad-en-suelos-nutrientes#:~:text=Cuando%20el%20perfil%20se%20satur%C3%B3,zinc%2C%20dej%C3%A1ndolo%20fuera%20de%20circulaci%C3%B3n>.

Tortora, Gerard J. Introducción a la microbiología. 9ª edición, Médica Panamericana, 2007.

USDA. Servicio de Conservación de Recursos Naturales. 2022. (en línea, sitio web). Disponible en <https://www.nrcs.usda.gov/>.

Villagran. 2019. Función de los macronutrientes en las plantas (en línea, sitio web). Consultado 7 nov. 2024. Disponible en <https://www.pot.cl/blog/1167-funcion-de-los-macronutrientes-en-las-plantas#>.

Williamson, J. 2013. Serie de información ambiental - pH del suelo: qué significa (en línea, sitio web). Disponible en [https://www.esf.edu/center/eis/soilph.php#:~:text=Los%20suelos%20extremadamente%20%C3%A1cidos%20\(pH,retenidos%20en%20la%20materia%20org%C3%A1nica](https://www.esf.edu/center/eis/soilph.php#:~:text=Los%20suelos%20extremadamente%20%C3%A1cidos%20(pH,retenidos%20en%20la%20materia%20org%C3%A1nica).

Zapata Miller, 2013. El suelo: un universo invisible. 2013.

Zhang, H., Schroder, J. L., Payton, M. E., & Focht, C. D. (2014). *Extractable soil nutrients using Mehlich-3 and ammonium acetate in Oklahoma soils. Soil Science Society of America Journal*, 78(6), 2074–2081. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.04.0144>

- Zhang, H.; Schroder, J. L.; Payton, M. E.; Wang, J. J.; Zhou, D.; Basta, N. T.; Storm, D. E. 2014. *Evaluation of Mehlich 3 as a universal extractant for plant nutrients*. *Soil Science*, 179(9-10): 453–462. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000089>
- Zhang, Y.; Li, X.; Wang, H.; Chen, J. (2021). *Influence of soil organic matter on pH buffering capacity in agricultural soils*. *Soil Science and Plant Nutrition*, v. 67, n. 4, p. 450–460, 2021. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/00380768.2021.1872345>.
- Zheng, G; Ye, C; Xu, Y; Chu, G; Liu, YL; Zhang, X; Wang, D. 2024. Efecto de la textura del suelo en el estado nutricional del suelo y la absorción de nutrientes en suelos de arroz: Laboratorio Estatal Clave de Biología del Arroz, Instituto Nacional de Investigación del Arroz de China, Hangzhou 311400, China (en línea). MDPI 1339. Disponible en <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/6/1339>

ANEXOS



Anexo 1 Pesado y adición de reactivo para análisis de Textura



Anexo 2 Agitación y toma de lecturas con Hidrómetro para análisis de Textura de suelo



Anexo 3 Pesado de suelo para análisis de Materia Orgánica y adición de reactivo



Anexo 4 Titulación de análisis de Materia Orgánica



Anexo 5 Agregado de solución Bray-II y filtrado para análisis de Fósforo por metodología GLOSOLAN



Anexo 6 Lectura de muestra de suelo en equipo Espectrofotómetro de UV- visible



Anexo 7 Filtrado y extracto de Solución Mehlich-III



Anexo 8 Preparación de reactivo de Acetato de Amonio pH7 de metodología GLOSOLAN



Anexo 11 Espectrofotómetro UV- visible (análisis de Fósforo)