



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS**  
**NATURALES**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD FÍSICOQUÍMICA DEL SUELO  
AFECTADO POR INCENDIOS FORESTALES EN EL CERRO  
PUTZALAHUA DE COTOPAXI.”**

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de  
Ingenieros Ambientales.

**Autores:**

Calero Yáñez Katherin Paola  
Iza Toapanta Alexander Rafael

**Tutor:**

Moreno Ávila Andrés Sebastián

**LATACUNGA – ECUADOR**

**Julio 2025**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Calero Yáñez Katherin Paola, con cédula de ciudadanía No. 1724936024 e Iza Toapanta Alexander Rafael, con cédula de ciudadanía No. 0503928319, declaramos ser autores del presente Proyecto de Investigación: **“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD FISICOQUÍMICA DEL SUELO AFECTADO POR INCENDIOS FORESTALES EN EL CERRO PUTZALAHUA DE COTOPAXI.”**, siendo el Ingeniero Mg. Andrés Sebastián Moreno Ávila, Tutor del presente trabajo; y, eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Latacunga, 21 de julio del 2025



Katherin Paola Calero Yáñez  
C.C: 1724936024  
**ESTUDIANTE**



Alexander Rafael Iza Toapanta  
C.C: 0503928319  
**ESTUDIANTE**

## **CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR**

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **CALERO YÁNEZ KATHERIN PAOLA**, identificada con cédula de ciudadanía **1724936024** de estado civil soltera, a quien en lo sucesivo se denominará **LA CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

**ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA.** – **LA CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado **“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD FÍSICOQUÍMICA DEL SUELO AFECTADO POR INCENDIOS FORESTALES EN EL CERRO PUTZALAHUA DE COTOPAXI.”**, la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

### **Historial Académico**

Inicio de la carrera: Octubre 2021 – Marzo 2022

Finalización de la carrera: Abril – Agosto 2025

Tutor: Ing. Andrés Sebastián Moreno Ávila, Mg.

Tema: **“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD FÍSICOQUÍMICA DEL SUELO AFECTADO POR INCENDIOS FORESTALES EN EL CERRO PUTZALAHUA, DE COTOPAXI.”**

**CLÁUSULA SEGUNDA.** - **LA CESIONARIA** es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

**CLÁUSULA TERCERA.** - Por el presente contrato, **LA CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

**CLÁUSULA CUARTA.** - **OBJETO DEL CONTRATO:** Por el presente contrato **LA CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

- a) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
- b) La publicación del trabajo de grado.
- c) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
- d) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.
- e) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

**CLÁUSULA QUINTA.** - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **LA CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

**CLÁUSULA SEXTA.** - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

**CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD.** - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **LA CEDENTE** podrá utilizarla.

**CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS.** - **LA CESIONARIA** podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **LA CEDENTE** en forma escrita.

**CLÁUSULA NOVENA.** - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

**CLÁUSULA DÉCIMA.** - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

**CLÁUSULA UNDÉCIMA.** - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 21 días del mes de julio del 2025.



Katherin Paola Calero Yáñez

**LA CEDENTE**

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.

**LA CESIONARIA**

## **CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR**

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **IZA TOAPANTA ALEXANDER RAFAEL**, identificado con cédula de ciudadanía **0503928319** de estado civil soltero, a quien en lo sucesivo se denominará **EL CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

**ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA.** – **LA CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado **“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD FÍSICOQUÍMICA DEL SUELO AFECTADO POR INCENDIOS FORESTALES EN EL CERRO PUTZALAHUA DE COTOPAXI.”**, la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

### **Historial Académico**

Inicio de la carrera: Octubre 2021 – Marzo 2022

Finalización de la carrera: Abril – Agosto 2025

Tutor: Ing. Andrés Sebastián Moreno Ávila, Mg.

Tema: **“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD FÍSICOQUÍMICA DEL SUELO AFECTADO POR INCENDIOS FORESTALES EN EL CERRO PUTZALAHUA DE COTOPAXI.”**

**CLÁUSULA SEGUNDA.** - **LA CESIONARIA** es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

**CLÁUSULA TERCERA.** - Por el presente contrato, **LA CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

**CLÁUSULA CUARTA.** - **OBJETO DEL CONTRATO:** Por el presente contrato **LA CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

- f) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
- g) La publicación del trabajo de grado.
- h) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
- i) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.
- j) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

**CLÁUSULA QUINTA.** - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **LA CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

**CLÁUSULA SEXTA.** - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

**CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD.** - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **LA CEDENTE** podrá utilizarla.

**CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS.** - **LA CESIONARIA** podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **LA CEDENTE** en forma escrita.

**CLÁUSULA NOVENA.** - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

**CLÁUSULA DÉCIMA.** - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

**CLÁUSULA UNDÉCIMA.** - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 21 días del mes de julio del 2025.

Alexander Rafael Iza Toapanta

**EL CEDENTE**

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.

**LA CESIONARIA**

## **AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

En calidad de Tutor del Proyecto de Investigación con el título:

**“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD FISICOQUÍMICA DEL SUELO AFECTADO POR INCENDIOS FORESTALES EN EL CERRO PUTZALAHUA DE COTOPAXI”**, de Calero Yánez Katherin Paola e Iza Toapanta Alexander Rafael, de la carrera de Ingeniería Ambiental , considero que el presente trabajo investigativo es merecedor del aval de aprobación al cumplir las normas, técnicas y formatos previstos, así como también han incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la pre-defensa.

Latacunga, 21 de julio del 2025



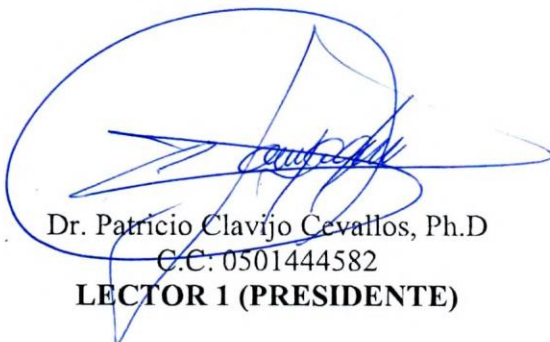
Ing. Andrés Sebastián Moreno Ávila, Mg.  
C.C: 0503220063  
**DOCENTE TUTOR**

## **AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN**

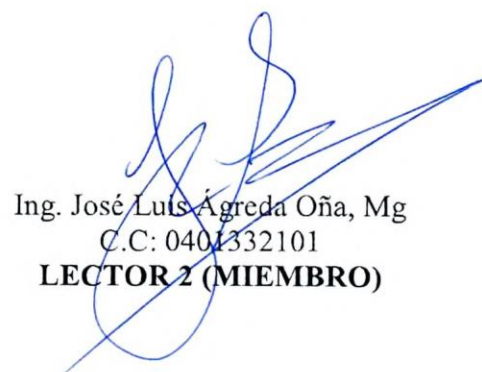
En calidad de Tribunal de Lectores, aprobamos el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi; y, por la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales; por cuanto, los postulantes: Calero Yáñez Katherin Paola e Iza Toapanta Alexander Rafael, con el título de Proyecto de Investigación: **“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD FÍSICOQUÍMICA DEL SUELO AFECTADO POR INCENDIOS FORESTALES EN EL CERRO PUTZALAHUA DE COTOPAXI”**, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

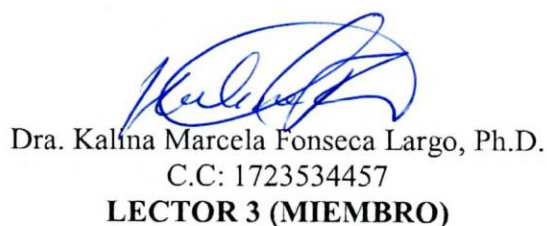
Latacunga, 21 de julio del 2025



Dr. Patricio Clavijo Cevallos, Ph.D  
C.C: 0501444582  
**LECTOR 1 (PRESIDENTE)**



Ing. José Luis Ágreda Oña, Mg  
C.C: 0401332101  
**LECTOR 2 (MIEMBRO)**



Dra. Kalina Marcela Fonseca Largo, Ph.D.  
C.C: 1723534457  
**LECTOR 3 (MIEMBRO)**

## **AGRADECIMIENTO**

*A lo largo de esta etapa universitaria he tenido la dicha de contar con el apoyo y el cariño de personas que han sido fundamentales para alcanzar este logro.*

*A mis padres, por sus sacrificios y por ser mi mayor inspiración. A mis hermanas y demás miembros de mi familia, por sus palabras y apoyo a lo largo de mi carrera.*

*A la persona que me acompañó con amor y fuerza en el proceso, alguien que estuvo en los momentos de cansancio, dudas y también en los momentos de alegría, paciencia, comprensión y constatación de motivación, gracias por siempre decir que estas orgulloso de mi, gracias Alexander. A todos mis maestros, por compartir sus conocimientos, dentro y fuera del aula, y en especial a mi tutor de tesis, por su guía, tiempo y compromiso en este proceso.*

*A mi tutor de tesis, el Ingeniero Andrés Moreno por su guía, tiempo y compromiso durante todo este proceso.*

*A los lectores de mi tesis, por su valioso tiempo y sus observaciones que contribuyeron significativamente a mejorar este trabajo.*

*Y, en especial, al Dr. Patricio Clavijo, por brindarme la oportunidad de ser su ayudante de cátedra, por confiar en mí y por ser un ejemplo de profesionalismo y vocación docente. A todos, gracias por ser parte de este camino.*

***Katherin Paola Calero Yáñez***

## **AGRADECIMIENTO**

*Agradezco a Dios, por guiarme y empoderarme en cada paso del camino. Cuando dudaba, Él sostenía mis manos; cuando estaba feliz, Él decía: "lo que estás haciendo tiene sentido."*

*A mis abuelos, mi madre y mis hermanos, por su amor infinito. Gracias por su presencia siempre, por empujarme en silencio y con palabras en el momento adecuado, por nunca sentir que estaba solo.*

*A la Universidad Técnica de Cotopaxi y muy en especial a la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, que me abrieron sus puertas y me permitieron desarrollarme. Gracias a mis educadores por enseñarnos con dedicación y respeto.*

*A mi tutor de tesis, Ingeniero Andrés Moreno, por su cercana instrucción, por darme no solo su conocimiento sino su amistad. Su apoyo continuo fue indispensable para llevar a cabo este estudio de investigación.*

*Y a ti, Katherin por tu amor sereno y sincero. Gracias por estar aquí todo el tiempo animándome, creyendo en mí y recordándome con tu sola presencia que valía la pena seguir adelante.*

**Alexander Rafel Iza Toapanta**

## **DEDICATORIA**

*A mis padres, por todo su amor incondicional, su esfuerzo, su apoyo constante y por inculcarme valores que han sido fundamentales a lo largo de mi formación. Gracias por ser mi base y mi fuerza.*

*A mis hermanas, por creer en mí y, a pesar de todo haber sabido seguir adelante.*

*Esta tesis es para ustedes, con todo mi amor y gratitud.*

***Katherin Paola Calero Yáñez***

## **DEDICATORIA**

*A mis abuelos, María y Rafael, quienes fueron los líderes de mi infancia y mi vida. Ellos continúan conmigo incluso en los momentos más oscuros con tales enseñanzas, valores y compasión. Gracias por enseñarme, con su ejemplo, el poder de la bondad.*

*A mi madre, Susana Iza, quien ha sido apoyo sin prejuicios y fuerza silenciosa. Su amor y apoyo inquebrantables han sido clave para lograr este objetivo profesional.*

*A mis alas, mi tío César Iza y mi padrastro Guillermo Guaita, quienes siguen guiando mi camino desde lo alto. Al ver uno de mis objetivos cumplidos, continúan creyendo en mí.*

*A mi hermana, Daysy, quien me brindó apoyo emocional y financiero, y a mi hermano, Jhonny, quien es una fuente de inspiración y estímulo. Gracias por mostrarme siempre que no existe tal cosa como rendirse. Y también a Hima, mi gata, por su compañía nocturna y amor silencioso, quien me enseñó que el afecto no necesita palabras. En sus ojos encontré descanso cuando el cansancio vencía a la voluntad.*

*Alexander Rafael Iza Toapanta*

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

# **TÍTULO: “EVALUACIÓN DE LA CALIDAD FISICOQUÍMICA DEL SUELO AFECTADO POR INCENDIOS FORESTALES EN EL CERRO PUTZALAHUA DE COTOPAXI.”.**

## **Autores:**

Calero Yáñez Katherin Paola  
Iza Toapanta Alexander Rafael

## **RESUMEN**

En los últimos años, el cerro Putzalahua, ubicado en la provincia de Cotopaxi, ha enfrentado incendios forestales recurrentes que han deteriorado la calidad del suelo y alterado el equilibrio del ecosistema altoandino. Con el objetivo de aportar una base técnica para su recuperación, se evaluaron las propiedades fisicoquímicas del suelo en zonas afectadas y no afectadas, siguiendo los lineamientos del Acuerdo Ministerial 097-A emitido por el [MAATE]. Para ello, se aplicó un diseño cuasi-experimental, mediante un muestreo estratificado a dos profundidades [0–15 cm y 15–30 cm], analizando parámetros mediante métodos estandarizados: pHmetro para el pH, pasta saturada para la CE, calcinación para MO, kit portátil LAQUAtwin para K, Ca y Na, y el método del hidrómetro para determinar la textura. El tratamiento estadístico de los datos se realizó mediante ANOVA de dos vías con InfoStat. De este modo los resultados revelaron un impacto químico persistente en los suelos afectados por incendios. Los resultados revelaron un deterioro significativo en la calidad fisicoquímica del suelo afectado. Se registró una acidificación superficial [pH promedio de 6.25], resultado de la pérdida de cationes básicos y la acumulación de compuestos ácidos residuales tras la combustión de materia orgánica. Esta condición reduce la disponibilidad de nutrientes y limita la actividad microbiana. De forma complementaria, el contenido de materia orgánica disminuyó hasta 1.21 %, reflejando la pérdida de biomasa edáfica por combustión y erosión, lo que debilita la estructura del suelo y reduce su capacidad de retención hídrica y nutricional. A nivel nutricional, las concentraciones superficiales de Ca y K aumentaron debido a la liberación térmica de minerales; sin embargo, este incremento generó un desequilibrio iónico desfavorable, dificultando la absorción de nutrientes y afectando la recuperación vegetal. Por otro lado, la textura franco-arcillosa y los niveles de sodio se mantuvieron estables, aunque el Na registró valores medios que implican riesgo de salinización. Finalmente, el suelo mostró una disminución del 11.62 % en N total y del 10.39 % en P, reflejando un agotamiento progresivo de nutrientes esenciales. En conclusión, estos cambios comprometen la función ecológica del suelo, afectando su capacidad de almacenar agua y nutrientes y ralentizando la regeneración natural del ecosistema de páramo.

**Palabras clave:** Análisis fisicoquímico, calidad del suelo, degradación, estadística, resiliencia ecológica.

**TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI**  
**FACULTY OF AGRICULTURAL SCIENCE AND NATURAL RESOURCES**

**THEME: “EVALUATION OF THE PHYSICOCHEMICAL QUALITY OF THE SOIL AFFECTED BY FOREST FIRES IN THE PUTZALAHUA HILL OF COTOPAXI”.**

**Authors:**

Calero Yáñez Katherin Paola Iza  
Toapanta Alexander Rafael

**ABSTRACT**

In recent years, on the Putzalahua hill, located in the province of Cotopaxi, has faced recurring forest fires that have deteriorated soil quality and altered the balance of the high Andean ecosystem. With the aim of providing a technical basis for its recovery, the physicochemical properties of the soil in affected and unaffected areas were evaluated, following the guidelines of Ministerial Agreement 097-A issued by the [MAATE]. For this purpose, a quasiexperimental design was applied, using stratified sampling at two depths [0–15 cm and 15–30 cm], analyzing parameters using standardized methods: pH meter for pH, saturated paste for EC, calcination for OM, LAQUAtwin portable kit for K, Ca, and Na, and the hydrometer method to determine texture. The data were statistically analyzed using two-way ANOVA with InfoStat. The results revealed a persistent chemical impact on soils affected by fires. The results revealed a significant deterioration in the physicochemical quality of the affected soil. Surface acidification was observed (average pH of 6.25), resulting from the loss of basic cations and the accumulation of residual acid compounds after the combustion of organic matter. This condition reduces nutrient availability and limits microbial activity. Complementarily, the organic matter content decreased to 1.21%, reflecting the loss of edaphic biomass due to combustion and erosion, which weakens the soil structure and reduces its water and nutrient retention capacity. At the nutritional level, surface concentrations of Ca and K increased due to the thermal release of minerals; however, this increase generated an unfavorable ionic imbalance, hindering nutrient absorption and affecting plant recovery. On the other hand, the loamy-clay texture and sodium levels remained stable, although Na recorded average values that imply a risk of salinization. Finally, the soil showed an 11.62% decrease in total N and a 10.39% decrease in P, reflecting a progressive depletion of essential nutrients. In conclusion, these changes compromise the ecological function of the soil, affecting its ability to store water and nutrients and slowing down the natural regeneration of the páramo ecosystem.

**Keywords:** Physicochemical analysis, soil quality, degradation, statistics, ecological resilience.

**ÍNDICE DE CONTENIDOS**

DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	ii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR .....	iii

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR .....	v
AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN .....	vii
AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN .....	viii
<i>AGRADECIMIENTO</i> .....	ix
<i>AGRADECIMIENTO</i> .....	x
<i>DEDICATORIA</i> .....	xi
<i>DEDICATORIA</i> .....	xii
RESUMEN .....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
1. INFORMACIÓN GENERAL.....	1
2. INTRODUCCIÓN .....	2
3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO .....	3
4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO.....	4
5. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	5
6. OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	6
6.1. Objetivo General .....	6
6.2. Objetivos Específicos.....	6
7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS...	7
8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA.....	8
8.1. El suelo .....	8
8.2. Composición del suelo .....	8
8.3. Suelos de páramo.....	8
8.4. Los incendios forestales .....	8
8.5. La degradación del suelo por incendio forestales .....	9
8.6. Factores que influyen en la severidad del impacto por incendios forestales.....	9
8.7. Topografía como factor agravante de incendios .....	9
8.8. Propiedades físicas .....	10
8.8.1. Textura del suelo .....	10
8.8.2. Estructura del suelo .....	10
8.8.3. Densidad.....	11

8.9. Propiedades químicas.....	11
8.9.1. pH del suelo.....	11
8.9.2. Materia Orgánica.....	11
8.9.3. Textura .....	12
8.9.4. Nutrientes .....	12
8.10. Impacto de los Incendios Forestales en las Propiedades del Suelo .....	12
8.10.1. Efectos físicos .....	12
8.10.2. Efectos químicos .....	13
8.10.3. Efectos biológicos .....	14
8.11. El Análisis Estadístico paramétrico como prueba para determinación del Impacto .....	14
8.11.1. Pruebas paramétricas y no paramétricas .....	14
8.11.2. La ANOVA cruzada (de dos vías) .....	15
8.11.3. Los métodos no paramétricos.....	15
8.11.4. Software Infostat .....	15
8.12. El Contexto del Cerro Putzalahua .....	16
8.12.1. Características ecológicas .....	16
8.12.2. Tipo de ecosistema.....	16
8.12.3. Posible Vulnerabilidad de los Suelos Locales a los Incendios .....	16
8.13. Normativa calidad del suelo.....	17
8.13.1. Acuerdo Ministerial 097-A. Anexo 2, norma de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados.....	18
8.13.2. Artículo 14, Constitución de la República del Ecuador (2008).....	18
8.13.3. El Artículo 409 de la Constitución de la República del Ecuador (2008).....	18
8.13.4. Código Orgánico del Ambiente (2017).....	19
8.13.5. Artículo: 100 del Código Orgánico del Ambiente (2017) .....	19
8.13.6. Norma Técnica para Evaluación y Valoración de Datos por Incendios Forestales (2015) .....	19
8.13.7. Plan Nacional de Restauración Forestal (2019).....	20
9. VALIDACIÓN DE LAS HIPÓTESIS .....	20

10. ÁREA DE ESTUDIO.....	20
11. METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL .....	21
11.1. Fases de investigación.....	22
11.1.1 Investigación de campo.....	22
11.1.2. Investigación de laboratorio.....	22
11.1.3. Investigación de gabinete.....	22
11.2. Metodología para el Primer Objetivo .....	23
11.2.1. Trabajo de campo.....	23
11.2.2. Muestreo .....	26
11.2.3. Técnica.....	26
11.2.4. Materiales y equipos .....	27
11.3. Metodología para el Segundo Objetivo .....	28
11.3.1. Análisis de laboratorio .....	28
11.3.2. Proceso de Análisis de los Parámetros Químicos en Laboratorio: .....	28
11.3.3. Proceso de Análisis de los Parámetros Físicos en Laboratorio.....	34
11.3.4. Metodología para el Análisis Estadístico de Datos.....	39
11.3.3. Herramientas: .....	42
11.4. Metodología para el Tercer Objetivo .....	42
11.4.2. Método .....	42
11.4.3. Técnicas .....	42
11.4.1. Herramientas: .....	43
12. COMPROBACIÓN DE HIPÓTESIS .....	43
12.1. Normalidad para Cada Grupo .....	43
12.2. Homogeneidad de Varianzas entre los Grupos .....	47
12.3. ANOVA de dos vías .....	51
13. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	57
13.1. Resultados del Análisis Estadístico de Datos Obtenidos en Laboratorio .....	57
13.1.1. Análisis estadístico de los datos.....	65

13.2. Propuesta de estrategias sostenibles para el mejoramiento y restauración de la calidad del suelo en el Cerro Putzalahua .....	85
14. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	92
14.1. Conclusiones .....	92
14.2. Recomendaciones .....	94
15. BIBLIOGRAFÍAS .....	94

18

16. ANEXOS .....	102
Anexo I. Aval de traducción del Abstract .....	102
Anexo II. Análisis de N y P en suelos afectado y no afectado por el incendio. ....	103
Anexo III. Reconocimiento del área de estudio. ....	103
Anexo IV. Proceso de toma y preparación de muestras de suelo en campo.....	104
Anexo V. Aireado de muestras en laboratorio. ....	104
Anexo VI. Análisis en el laboratorio Universidad Técnica de Cotopaxi. ....	105
Anexo VII. Resultados en el laboratorio “UTC”. ....	105

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de los beneficiarios del proyecto .....	5
Tabla 2. Sistema de tareas para cada objetivo. ....	7
Tabla 3. Hipótesis estadísticas planteadas .....	20
Tabla 4. Materiales para el Muestreo .....	27
Tabla 5. Materiales y equipos para determinar pH .....	28

Tabla 6. Rangos para pH .....	29
Tabla 7. Materiales y equipos para determinar MO .....	30
Tabla 8. Porcentajes de MO .....	31
Tabla 9. Materiales, reactivos y equipos para determinar nutrientes .....	32
Tabla 10. Rangos para la interpretación de nutrientes.....	33
Tabla 11. Materiales y equipos para determinar CE .....	34
Tabla 12. Materiales, reactivos y equipos para determinar textura .....	35
Tabla 13. Diámetro de partículas .....	38
Tabla 14. Materiales y programas .....	41
Tabla 15. Normalidad para cada grupo .....	42
Tabla 16. Normalidad para cada grupo transformando a Ln .....	45
Tabla 17. Comprobación de la normalidad de las variables fisicoquímicas y transformaciones previas al ANOVA .....	45
Tabla 18. Comprobación de homogeneidad y procedimiento estadístico aplicado a las variables fisicoquímicas previas al ANOVA .....	50
Tabla 19. ANOVA para la variable condición .....	51
Tabla 20. ANOVA para la variable profundidad .....	53
Tabla 21. ANOVA de la interacción condición y profundidad .....	53
Tabla 22. Resultados de hipótesis .....	55
Tabla 23. Resultados pH .....	56
Tabla 24. Resultados CE .....	58
Tabla 25. Resultados Nutrientes (Ca, K, Na) .....	59
Tabla 26. Resultados Nutrientes N y P .....	60
Tabla 27. Resultados MO .....	61
Tabla 28. Resultados Textura .....	62
Tabla 29. Análisis estadístico pH. ....	64
Tabla 30. Interpretación Resultados estadísticos CE .....	68
Tabla 31. Interpretación Estadística Mo .....	71
Tabla 32. Interpretación estadística Nutriente Potasio (K) .....	73
Tabla 33. Análisis estadístico nutriente Calcio (Ca).....	74
Tabla 34. Análisis estadístico nutriente Sodio (Na) .....	74
Tabla 35. Análisis de diferencia porcentual.....	78

Tabla 36. Análisis estadístico textura variable- %arena .....	80
Tabla 37. Análisis estadístico textura variable- %Arcilla.....	81
Tabla 38. Análisis estadístico textura variable- %Limo .....	81
Tabla 39. Propuestas de estrategias mejoramiento del suelo.....	86

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del Cerro Putzalahua .....	21
Figura 2. Metodología y diseño experimental .....	23
Figura 3. Área afectada por el incendio .....	24
Figura 4. Método de cuarteo .....	26
Figura 5. Recorrido zigzag .....	27
Figura 7. Triángulo textural .....	38
Figura 8. Residuos estandarizados de Ca, Na y K .....	47
Figura 9. Residuos estandarizados de Ln_%MO y pH .....	48
Figura 10. Residuos estandarizados de textura .....	49
Figura 11. Residuos estandarizados de Ln_CE .....	50
Figura 12. Análisis estadístico de pH .....	65
Figura 13. Análisis estadístico CE.....	68
Figura 14. Análisis estadístico MO .....	71
Figura 15. Análisis estadístico de nutrientes .....	75
Figura 16. Análisis estadístico de textura .....	82



## **1. INFORMACIÓN GENERAL**

### **Título**

“Evaluación de la calidad fisicoquímica del suelo afectado por incendios forestales en el Cerro Putzalahua de Cotopaxi”.

### **Lugar de ejecución.**

Cerro Putzalahua-Belisario Quevedo-Latacunga-Cotopaxi

### **Institución, unidad académica y carrera que auspicia**

Universidad técnica de Cotopaxi-Facultad de ciencias agropecuarias y de recursos naturales-Ingeniería ambiental

### **Nombres de equipo de investigadores**

Tutor: Ing. Andrés Sebastián Moreno Ávila Mg.

Lector 1 (presidente): Dr. Patricio Clavijo Cevallos, Ph.D.

Lector 2: Ing. José Luis Ágredda Oña, Mg.

Lector3: Dra. Kalina Marcela Fonseca Largo, Ph.D.

Autores: Calero Yáñez Katherin Paola e Iza Toapanta Alexander Rafael **Área**

### **de Conocimiento.**

Protección del medio ambiente.

### **Línea de investigación:**

Análisis, conservación y aprovechamiento de la biodiversidad local.

### **Línea de Vinculación:**

Gestión de recursos naturales, biodiversidad, biotecnología y genética, para el desarrollo humano y social.

## 2. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales representan una de las principales amenazas ecológicas a escala global y local, porque pueden causar cambios radicales en los ecosistemas terrestres. De hecho, durante estos eventos, el carbono que se ha acumulado durante décadas en la biomasa vegetal se libera en cuestión de horas, enriqueciendo la carga de gases de efecto invernadero (Castillo et al., 2003). Como resultado, este evento no solo afecta el clima global, sino que también afecta el funcionamiento de los ecosistemas andinos.

En este contexto, los páramos de Ecuador son ecosistemas importantes y vulnerables, cuya dinámica influye directamente en su integridad ecológica. Estos eventos conducen a una nueva cobertura vegetal, ciclos biogeoquímicos y composición de retención de agua y carbono. Sin embargo, los estudios que evalúan directamente el efecto del fuego en el suelo de estos ecosistemas aún no son suficientes (Tillaguango et al., 2023). No obstante, se sabe poco sobre cómo estos fenómenos afectan las propiedades fisicoquímicas del suelo, particularmente en regiones de alta montaña como el cerro Putzalahua.

Los incendios forestales, según su intensidad y duración, afectan el suelo de forma significativa, como han reportado varios estudios. Estos consisten en la disminución de la materia orgánica y el contenido de nitrógeno, modificación de la estructura de los agregados, incremento de la hidrofobicidad y disminución de la actividad microbiana (Garrido, 2023; Minervini et al., 2018; Ramos-Rodríguez et al., 2024). Por lo tanto, disminuyen la fertilización del suelo, actúan en contra del poder de crecimiento de las plantas y aumentan la probabilidad de erosión y desertificación del suelo.

El cerro Putzalahua, de la parroquia Belisario Quevedo del cantón Latacunga, ha sido identificado como un ecosistema afectado recurrentemente por incendios, (Cordones & Jiménez, 2022). La pérdida de cobertura vegetal, el desplazamiento de fauna nativa y las modificaciones en el microclima atestiguan estudios previos a una evidente degradación ecológica. Sin embargo, nadie comprende profundamente la calidad del suelo en las áreas quemadas.

Por ello, este estudio tiene como objetivo evaluar comparativamente las propiedades fisicoquímicas del suelo en el cerro Putzalahua tanto en zonas afectadas como no afectadas por los incendios forestales ocurridos en agosto de 2020. En este sentido, se utilizó un diseño de

laboratorio cuasiexperimental que busca evaluar los cambios en la calidad del suelo debido a incendios forestales en el ecosistema de páramo. Se midieron parámetros fisicoquímicos como el pH, la conductividad eléctrica (CE), la materia orgánica (MO) y la textura, y también se determinó la concentración de nutrientes esenciales [Na, K, Ca, N, P] mediante métodos utilizados en estudios internacionales de suelos afectados por estrés ambiental (Soto et al., 2024). El análisis estadístico utilizará análisis de varianza y prueba de comparación de medias con el programa InfoStat.

Es importante mencionar que una de las limitaciones metodológicas en los estudios sobre suelos afectados por incendios forestales en ecosistemas de páramo está relacionada con la accesibilidad al terreno durante la temporada de lluvias. Esto puede afectar la cobertura espacial y temporal de las muestras. Para reducir este sesgo, se realizó un muestreo sistemático y controlado en las áreas seleccionadas quemadas y no quemadas, como en algunos estudios de suelos agrícolas (Ramírez et al., 2018).

### **3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

La presente investigación aborda la necesidad de comprender el impacto de los incendios forestales en la calidad del suelo en ecosistemas sensibles como el páramo de alta montaña del Cerro Putzalahua, cantón Latacunga. Estos hábitats cumplen servicios ecosistémicos críticos, incluyendo la regulación del agua, la captura de carbono y la conservación de la biodiversidad, pero han sido cada vez más fragmentados y degradados por quemaduras repetidas y la expansión de la agricultura descontrolada.

A pesar del impacto ambiental documentado, no se han identificado estudios específicos que se centren directamente en las transformaciones de las propiedades fisicoquímicas del suelo después de que ocurre un incendio en este tipo de cobertura vegetal. Esta falta de conocimiento impide el diseño de estrategias de conservación para construir una restauración ecológica efectiva y una planificación del uso del suelo, especialmente en áreas de recarga de agua y críticas para los servicios ecosistémicos. Además, los incendios forestales, según el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, (2019) representan una de las principales razones de la degradación de los ecosistemas en el país, modificando suelos, fuentes de agua y la cobertura de especies nativas, por lo que se deben realizar estudios para contribuir a las acciones de recuperación y control ambiental.

Desde el enfoque científico, este estudio aporta a un campo poco explorado de la ingeniería ambiental. Hay pocos estudios de áreas mediterráneas o agrícolas que exploren los efectos de los incendios en los suelos (Garrido, 2023; Minervini et al., 2018), pero los resultados no pueden extrapolarse fácilmente a los ecosistemas altoandinos. Por lo tanto, el objetivo del estudio es proporcionar datos locales basados en métodos experimentales validados en laboratorio e inferencias estadísticas que permitan la interpretación de la dinámica de la descomposición y las alteraciones de la fertilidad y niveles importantes de los parámetros como el pH, la conductividad eléctrica o algún nutriente en los efectos del fuego sobre los páramos.

Los resultados obtenidos permitieron identificar indicadores útiles para el monitoreo ambiental, ayudando en procesos de restauración ecológica y para brindar asistencia técnica al MAATE, gobiernos locales, juntas parroquiales y comunidades. En sintonía con la propuesta del Instituto Nacional de Patrimonio Cultural, (2015), que considera a los páramos como paisajes culturales estratégicos (por ejemplo, páramos y pueblos), en los cuales llevar a cabo estas investigaciones se vuelve de suma importancia para la condición de los planes de recuperación, reforestaciones con especies nativas y manejo sostenible del suelo.

Además, esta investigación está directamente conectada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible [ODS], especialmente con el ODS 13, Acción por el Clima y el ODS 15, Vida de Ecosistemas Terrestres, a través de la información técnica y el conocimiento crítico que estamos generando, los cuales podrían ser utilizados para reforzar la resiliencia de los sistemas naturales frente a perturbaciones como el cambio climático y la degradación ambiental (Gómez Gil, 2018). También aborda las recomendaciones que sustentan el Código Orgánico Ambiental de Ecuador sobre la gestión sostenible del suelo y la rehabilitación de áreas degradadas.

En síntesis, el presente estudio no solo contribuye con la comprensión técnico-científica de la calidad del suelo en ambientes post-incendio, sino que también sugiere estrategias adecuadas para la gestión, el uso del suelo y la conservación. Por lo tanto, su importancia y utilidad se influye a nivel nacional y los resultados allí se han integrado en las premisas de desarrollo sostenible.

#### **4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO**

Los beneficiarios del presente proyecto se clasifican en directos e indirectos. Los beneficiarios directos corresponden a la población que reside en la zona de intervención del estudio, mientras de los beneficiarios indirectos comprenden a los habitantes del cantón donde se encuentra localizado el ecosistema afectado, quienes se verán

favorecidos de forma secundaria mediante acciones de restauración ecológica y educación ambiental.

*Tabla 1. Distribución de los beneficiarios del proyecto*

<b>BENEFICIARIOS DIRECTOS</b>	
<b>Parroquia</b>	<b>Cantidad</b>
Belisario Quevedo	7.477 habitantes
<b>BENEFICIARIOS INDIRECTOS</b>	
<b>Cantón</b>	<b>Cantidad</b>
Latacunga	170 489 habitantes

*Nota:* La tabla presenta los beneficiarios directos ubicados parroquia de Belisario Quevedo y los beneficiarios indirectos correspondientes al cantón Latacunga. Fuente: Andrade, (2024).

## 5. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Los incendios forestales se han convertido en una amenaza creciente para los ecosistemas altoandinos en Ecuador. Estos eventos han afectado significativamente tanto la cobertura vegetal como la estructura y función de los suelos. Si bien el fuego es un componente natural de los ecosistemas (Doerr & Santín, 2016), su frecuencia e intensidad han aumentado considerablemente debido al cambio climático y a las actividades humanas descontroladas, lo que ha causado impactos negativos en los servicios ecosistémicos críticos (Comunidad de Práctica de Suelos, 2023).

Entre 2001 y 2020, Ecuador registró más de 7.297 km<sup>2</sup> de superficies quemadas, lo que representó el 2,9% del país. Las regiones más impactadas fueron la Sierra y la Costa (Cisneros Vaca et al., 2024). En este contexto, el cerro Putzalahua, ubicado en el cantón Latacunga, es un caso representativo, ya que es uno de los cerros más afectados por incendios causados por prácticas agrícolas, ganadería extensiva y recreativas sin control ambiental.

Por lo tanto, estos incendios no solo afectan la vegetación sobre el suelo, sino que también influyen significativamente en las propiedades fisicoquímicas del suelo. Varias investigaciones indican que el fuego puede aumentar la densidad aparente y disminuir la porosidad del suelo, modificar su pH, disminuir su material orgánico y disminuir la capacidad de intercambio catiónico del suelo (Comunidad de Práctica de Suelos, 2023; González, 2017).

Estos efectos retroalimentan directamente la capacidad del suelo para soportar plantas, almacenar agua y resistir la erosión.

Además, en zonas de pendiente pronunciada como el cerro Putzalahua, los incendios aumentan la escorrentía superficial y promueven los procesos de erosión, lo que provoca la pérdida permanente de las capas fértiles del suelo. Esto resulta en una degradación gradual del ecosistema, con impactos en la biodiversidad y la probabilidad de eventos extremos (Mataix & Artemi, 2009). Al final, se establece un ciclo perjudicial y se encuentra que la regeneración natural está extremadamente limitada.

Sin embargo, Carrión-Paladines et al. (2023) señalan que aún no existen estudios que sirvan como base de comparación para determinar el impacto específico de los incendios forestales, particularmente en el cerro Putzalahua, sobre los suelos del páramo andino en los Andes de Ecuador. Como resultado, existe una grave brecha de información que impide la planificación de prácticas de restauración y gestión ambiental con base técnica

Como resultado, se formulan hipótesis con fines de investigación. Pero por ahora, poder abordar el problema desde un enfoque cuasi-experimental no solo nos ayudará a determinar dónde estamos en relación con la condición del suelo tras las quemadas, sino que también ayudará al diseño forense a restaurar estos ecosistemas críticos para promover el equilibrio ecológico regional.

## **6. OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **6.1. Objetivo General**

Evaluar el impacto de los incendios forestales en la calidad fisicoquímica del suelo del Cerro Putzalahua, Cotopaxi, mediante análisis comparativo entre zonas afectadas y no afectadas.

### **6.2. Objetivos Específicos**

- Realizar un muestreo sistemático de suelos en zonas afectadas y no afectadas del Cerro Putzalahua, conforme a la normativa nacional vigente.
- Analizar en laboratorio las propiedades fisicoquímicas del suelo recolectado en el cerro Putzalahua, comparando las muestras afectadas y no afectadas por incendios forestales mediante análisis estadístico paramétrico ANOVA.

- Proponer estrategias sostenibles orientadas a la restauración las propiedades fisicoquímicas del suelo afectado por incendios forestales en el cerro Putzalahua.

## 7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

**Tabla 2.** Sistema de tareas para cada objetivo.

OBJETIVOS	METODOLOGÍA	ACTIVIDADES	RESULTADO
<b>Realizar un muestreo sistemático de suelos en zonas afectadas y no afectadas del Cerro Putzalahua, conforme a la normativa nacional vigente.</b>	Descriptivo y de campo	- Determinación del área de estudio (zonas afectadas y no afectadas). - Muestreo sistemático a dos profundidades (0–15 cm y 15–30 cm). - Etiquetado, almacenamiento y transporte de las muestras.	Muestras representativas del suelo quemado y no quemado adecuadamente recolectadas, etiquetadas y conservadas.
<b>Analizar en laboratorio las propiedades fisicoquímicas del suelo recolectado en el cerro Putzalahua, comparando las muestras afectadas y no afectadas por incendios forestales mediante análisis estadístico paramétrico ANOVA.</b>	Experimental y estadístico	- Análisis fisicoquímico en laboratorio UTC (pH, CE, MO, textura, K, Ca, Na) e INIAP (N y P). - Pruebas estadísticas: Shapiro-Wilk, ANOVA y boxplot de residuos (software InfoStat).	Resultados estadísticos confiables de las propiedades fisicoquímicas entre suelos afectados y no afectados.
<b>Proponer estrategias sostenibles orientadas a la restauración de las propiedades fisicoquímicas del suelo afectado por incendios forestales en el cerro Putzalahua.</b>	Propositiva y documental	- Revisión bibliográfica de fuentes científicas, técnicas, normativas, artículos científicos. - Identificación de técnicas adaptadas al páramo. - Propuesta basada en compost, revegetación nativa y monitoreo.	Propuesta técnica con estrategias sostenibles adaptadas al área del Cerro Putzalahua.

*Nota:* Resultados esperados para cada objetivo en base a la metodología y actividades planteadas.

## **8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA**

### **8.1. El suelo**

El suelo es una capa de la superficie de la tierra que se formó debido a la interacción de componentes como el clima, los organismos vivos, el material parental, las formas del terreno y el tiempo. Además, es dinámico y complejo ya que contiene varios procesos físicos, químicos y biológicos fundamentales que sustentan la vida en los ecosistemas terrestres. Su capacidad para proporcionar estos servicios ecosistémicos depende de su adecuada salud y funcionamiento, los cuales pueden ser drásticamente alterados por eventos como incendios forestales, particularmente aquellos de alta intensidad y frecuencia que superan la capacidad de recuperación del ecosistema natural (Zamora et al., 2022).

### **8.2. Composición del suelo**

El suelo es un sistema natural de tres fases que interactúan entre sí: sólido, líquido, gas. La fase particulada consiste en partículas mineralógicas e inorgánicas originadas por la meteorización, así como material orgánico de desechos biológicos. Mientras tanto, en el suelo, el agua y los elementos nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas se disuelven en la fase líquida o solución del suelo. La fase gaseosa, el aire del suelo, finalmente permite esos intercambios de gases necesarios para la actividad biológica (Narváez et al., 2018).

### **8.3. Suelos de páramo**

En los ecosistemas de alta montaña de los Andes tropicales, los suelos de páramo cumplen un papel fundamental en el equilibrio ambiental. En primer lugar, se caracterizan por su alto contenido de materia orgánica, baja densidad aparente y gran capacidad de retención de agua, lo que les permite actuar como reguladores hidrológicos naturales. Además, presentan un pH moderadamente ácido y horizontes superficiales oscuros, asociados a la acumulación de humus. Estas propiedades, típicas de los Andosoles, están influenciadas por el clima frío, la humedad constante y la cobertura vegetal herbácea que predomina en estos ecosistemas (García et al., 2020).

### **8.4. Los incendios forestales**

Los incendios forestales son una de las fuerzas más destructivas que impactan la estructura y funciones de los suelos. Durante la quema de un ecosistema, las temperaturas en la

superficie pueden variar de 200 °C a más de 1000 °C, y así el calor se transfiere a los horizontes edáficos por debajo (Pausas, 2020). Dicho avance térmico inicia una serie de cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo; la intensidad de los cuales depende de la severidad y duración del fuego, junto con las características específicas del suelo en cuestión. Algunos de los cambios más obvios a corto plazo incluyen la combustión de materia orgánica, la alteración de la estructura del suelo y la volatilización de iones nutrientes.

### **8.5. La degradación del suelo por incendio forestales**

La degradación del suelo posterior al incendio se manifiesta como una consecuencia de múltiples procesos interrelacionados. La eliminación de la cobertura vegetal y de hojarasca deja la superficie del suelo descubierta y susceptible a fuerzas erosivas como la lluvia y el viento, lo que aumenta significativamente las tasas de erosión. Sin embargo, en sistemas donde el fuego no tiene mucha influencia o parte de múltiples fuegos aparecen en cortos períodos de tiempo, el fuego puede volverse irremediablemente dañino, llevando a un estado desértico y a la pérdida permanente de funciones eco sistemáticas que son esenciales para el suelo (Farfán et al., 2020).

### **8.6. Factores que influyen en la severidad del impacto por incendios forestales**

La intensidad de los incendios incluye la mayoría de los factores que determinan el impacto en el terreno. Esta variable, integrada con la temperatura y el tiempo que se mantiene el calor, siempre está determinada por la tendencia de liberación de energía por unidad de trinchera de llamas. Los incendios de alta intensidad que superan los 500°C queman varios centímetros en el perfil del suelo, penetrando profundamente. Los incendios de 500°C y superiores causan cambios minerales irreversibles en los organismos, partículas completas de compuestos de carbono y fusión orgánica modificadora (Villar et al., 2022). Por otro lado, las llamas de baja intensidad, comunes en quemas controladas prescritas, realizan cambios superficiales en el orden de micrómetros. Estos efectos son siempre más suaves y a menudo beneficiosos para ciertos procesos ecológicos, por ejemplo, la liberación de nutrientes atrapados en la hojarasca.

### **8.7. Topografía como factor agravante de incendios**

La topografía La topografía y ecología del área focal condicionan la transferencia del impacto del evento de incendio a los procesos de degradación post-incendio. Las pendientes son empinadas. El aumento de la fuente de erosión post-incendio es más pronunciado que en pendientes planas y también puede aumentar hasta 100 veces. La dirección de la pendiente

puede influir en la exposición y, por lo tanto, en las tasas de recuperación de la cubierta vegetal protectora. Son relevantes la distribución y magnitud de las lluvias, ya que es en las pendientes que ya estaban estabilizadas de manera natural o artificial donde la acción devastadora de las lluvias torrenciales de verano es más evidente (Galván & Magaña, 2020). La historia de disturbio establece dominantes el estado de resiliencia del sistema, que es altamente vulnerable donde suelos previamente degradados o incendios recurrentes han desactivado mecanismos de prevención.

## **8.8. Propiedades físicas**

### ***8.8.1. Textura del suelo***

La textura del suelo que se deriva del proceso de proporción de partículas de arena, limo y arcilla, constituye una propiedad física que determina directamente numerosas funciones ecosistémicas, dicha propiedad, que cambia lentamente a lo largo del tiempo, condiciona la capacidad de retención e infiltración de agua, la aireación, la resistencia a la erosión y la riqueza de hábitats para organismos edáficos. Suelos con texturas equilibradas (francos) generalmente presentan condiciones óptimas para el desarrollo vegetal, mientras que texturas extremas como arenosas o arcillosas se acompaña de uniformidad que impone específicas determinantes de adaptación en estructura a flora y microorganismos. Los incendios forestales tienen la potencialidad de alterar esta propiedad a causa de la fusión de partículas a altas temperaturas, creando agregados de manera artificial que alteren el comportamiento hidrofísico del suelo (Betancourt et al., 2020).

### ***8.8.2. Estructura del suelo***

La estructura La estructura del suelo se define como la organización de las partículas primarias en unidades o agregados separados por planos de debilidad. Esta propiedad emergente, resultante de la interacción entre componentes minerales, orgánicos y biológicos, establece el espacio poroso significativo para la retención y transporte de agua/gases/solutos, así como para el acceso de las raíces. Los agregados fuertes y estables en suelos bien estructurados tienen una influencia positiva en la retención e infiltración óptima de agua, el control de la erosión y en la diversidad de la biota que habita el suelo. La mejora estructural del suelo mediada por arbustos o árboles en pastizales podría lograrse inhibiendo la cadena de disturbios, facilitando la colonización de especies de arbustos más diversas, minimizando la perturbación del suelo o promoviendo la colonización productiva. El fuego afecta el material

orgánico cementante, destruyéndolo y alterando las características superficiales de los coloides con un colapso estructural parcial que impide el funcionamiento básico del ecosistema por períodos prolongados de tiempo (González & Ortiz, 2022).

### **8.8.3. Densidad**

La densidad aparente, o a granel, del suelo se define como la relación entre la masa de la muestra de suelo seca y su volumen (tanto los poros como los espacios se incluyen en el volumen). Es una medida de compactación y funcionalidad física. Los rangos considerados óptimos, generalmente entre 1.0 y 1.4 g/cm<sup>3</sup> para suelos minerales, permiten el crecimiento radicular, los procesos biológicos del suelo y los movimientos hidrológicos (Estrada et al., 2022). La densidad excesiva, generalmente correlacionada a la compactación natural o inducida por el ser humano, restringe la actividad biológica aumentando el agotamiento de oxígeno en la rizosfera de las plantas debido a una mayor resistencia mecánica a la penetración de raíces o a la reducción de la disponibilidad de oxígeno.

## **8.9. Propiedades químicas**

### **8.9.1. pH del suelo**

El pH del suelo es una propiedad química que controla la actividad microbiana y la solubilidad de elementos potencialmente tóxicos en relación con la disponibilidad de nutrientes. Este atributo de acidez o basicidad afecta la actividad, por ejemplo, de la capacidad de intercambio catiónico, la mineralización de materia orgánica, o la formación de complejos químicos con micronutrientes. En ecosistemas naturales, el pH edáfico cambia debido a micro meteorización, las aportaciones de materia orgánica y la lixiviación, formando equilibrios específicos para cada tipo de vegetación. Los fuegos forestales suelen causar un aumento temporal del pH, por la liberación de cationes básicos (calcio, magnesio, potasio) de las cenizas que en condiciones ácidas puede incrementar el pH en 2-3 unidades superando el pH 5, siendo este efecto muy persistente durante varios años (Ysla et al., 2023).

### **8.9.2. Materia Orgánica**

La materia orgánica del suelo es un compuesto fundamental que influye en el suelo en varios aspectos: influye tanto en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo como en ser una fuente de nutrientes, microorganismos, agente formador de agregados y regulador del agua. La materia orgánica consiste en una mezcla compleja y heterogénea de materiales en

diversos grados de degradación, que van desde residuos frescos hasta sustancias húmicas estabilizadas, y su cantidad y calidad impulsan en gran medida la fertilidad natural del suelo y su capacidad para proporcionar servicios ecosistémicos. Los efectos de los incendios en este componente del suelo dependen en gran medida de la intensidad del fuego: temperaturas moderadas pueden mejorar los procesos de liberación mineralógica de nutrientes disponibles, mientras que incendios severos eliminan completamente fracciones lábiles y transforman fracciones más recalcitrantes químicamente en compuestos aromáticos persistentes de alta energía que tienen fuertes impactos eco toxicológicos (Neger et al., 2022).

### ***8.9.3. Textura***

La textura del suelo es la distribución relativa de partículas minerales de diferentes tamaños, específicamente de arena, limo y arcilla. Esta característica física controla la cantidad de agua que puede retenerse, el contenido de aire y la disponibilidad de nutrientes. También determina las respuestas del suelo a acciones como la infiltración o la compactación. Por lo tanto, es importante comprender la composición textural para gestionar adecuadamente los sistemas agrícolas y conservar los recursos del suelo (Ye et al., 2024).

### ***8.9.4. Nutrientes***

Los nutrientes del suelo son cruciales para el crecimiento y el metabolismo de las plantas, ya que contienen los elementos esenciales utilizados en los procesos metabólicos. De hecho, la disponibilidad de estos insumos tiene una influencia directa en la magnitud de los rendimientos agrícolas. Pero se debe tener en cuenta que la aplicación excesiva de fertilizantes puede llevar a desequilibrios nutricionales y también tener impactos ambientales adversos.

Por lo tanto, la gestión eficiente de nutrientes (adquisición y utilización de estos elementos por las plantas) es esencial para lograr mejores rendimientos y minimizar las pérdidas económicas (Puentes et al., 2014).

## **8.10. Impacto de los Incendios Forestales en las Propiedades del Suelo**

### ***8.10.1. Efectos físicos***

En la naturaleza, el fuego provoca numerosos efectos, entre los más significativos están relacionados con la hidrofobicidad o repelencia al agua. La anterior mención de fenómeno

ocurre cuando algunos compuestos orgánicos volátiles (COV) emitidos durante la quema de biomasa y hojarasca se fusionan, por condensación, con partículas minerales formando recubrimientos hidrofóbicos que alteran drásticamente la capacidad de humectación del suelo. También la capa repelente puede desarrollarse dentro del perfil del suelo a varios centímetros de profundidad formando lagos que cimentan la escorrentía superficial. Dicho fenómeno provoca que, las tasas de infiltración de agua se reduzcan significativamente. La persistencia e intensidad de la severidad hidrofobicidad, en especial esta última, también dependen de factores térmicos como alcanzar temperaturas de 175 a 270 °C, el tipo de vegetación y su cantidad afectada (Ortiz & González, 2022).

### ***8.10.2. Efectos químicos***

La alteración del ciclo de nutrientes deriva en efectos inmediatos de química indistintos que resulta de los fuegos que se han dado en los bosques. Por lo tanto, al quemar biomasa vegetal y materia orgánica, el saber contiene, en tal proceso, sustancias que por mucho tiempo han permanecido se pueden liberar en estructuras complejas inorgánicas. Esto ocurre principalmente como óxidos y carbonato de las cenizas. Este fenómeno crea un pulso temporal de disponibilidad nutrimental, particularmente para cationes como calcio, magnesio y potasio, que puede incrementar muchas veces sus concentraciones extractables. Sin embargo, esta mejora química se ve contrarrestada por un gran número de otros procesos como las pérdidas flamígeras de nitrógeno y azufre severo a temperaturas mayores de 200°C, que pueden llegar a afectar el 80% del contenido original. Además, el azufre se transforma volatizando el fósforo en formas menos disponibles (Galván & Magaña, 2020).

Los cambios en el pH del suelo son uno más de los efectos químicos característicos del fuego en combinación con la adición masiva de las bases intercambiables en forma de ceniza. La tasa de aumento de pH puede diferir dentro de los límites de 0.5 a 3 unidades respecto a los valores anteriores, dependiendo de la cantidad y composición de las cenizas añadidas, y de las propiedades iniciales del suelo. Existe una considerable variación en la duración de este efecto dependiendo de las condiciones climáticas y topográficas, desde unas pocas semanas en áreas con alta pluviosidad y pendientes pronunciadas, hasta varios años en regiones semiáridas con topografía plana, donde la lixiviación y dilución de bases es más lenta (González & Ortiz, 2022).

### ***8.10.3. Efectos biológicos***

La microbiota del suelo experimenta cambios drásticos después de que un incendio la atraviesa, mostrando respuestas diferenciales entre grupos funcionales y la profundidad dentro del perfil del suelo. Dependiendo de si son bacterias o hongos, los miembros de la microbiota poseen diferentes grados de resistencia térmica. La mayoría de las bacterias mueren entre 50-80°C, pero muchos hongos pueden soportar hasta 120°C. Escapar de temperaturas letales es posible con mecanismos como esporas bacterianas y fúngicas que pueden resistir temperaturas de hasta 160°C (Neger et al., 2022). La recuperación de la población se caracteriza por patrones sucesionales complejos, pero está principalmente dominada por vida microbiana oportunista adaptada a altas temperaturas y pH alcalino, como termófilos y alcalifilos, antes de desplazarse gradualmente hacia comunidades funcionales más diversas y complejas con la estabilización de la condicionamiento del suelo (Ortiz & González, 2022).

La modificación fisicoquímica de un suelo cambia directamente la disponibilidad de recursos para la adaptación de la flora. Las asociaciones simbióticas esenciales, como las micorrizas, sufren pérdidas muy serias, y es que el exotismo se interpreta como un riesgo para los campesinos ectomorrísicos. Sus biomas podrían decrecer del 95% al 100% por incendios de alta intensidad. Al mismo tiempo, se alteran los microfósiles parásitos generando ventanas de oportunidades para formas preadaptadas (Flores, 2021). Esta atribución incluye a las plantas que liberan sustancias activas de residuos de fuego o humo. De este modo el aumento y restablecimiento vegetal será crucial para el éxito de esos retrocesos.

## **8.11. El Análisis Estadístico paramétrico como prueba para determinación del Impacto.**

### ***8.11.1. Pruebas paramétricas y no paramétricas***

El análisis estadístico de suelos de ecosistemas afectados por incendios forestales está intrínsecamente ligado a las características únicas del fenómeno en estudio. Hay muy pocos estudios sobre suelos en el grado en que sus propiedades edáficas satisfacen la normalidad, homocedasticidad e independencia, que son requisitos para pruebas paramétricas clásicas; estas condiciones a menudo son sesgadas positivamente, particularmente en lo que respecta al carbono orgánico, conductividad eléctrica o actividad enzimática. El examen formal de la normalidad, homocedasticidad o heterocedasticidad asumiendo el uso de pruebas de

ShapiroWilk, Kolmogorov-Smirnov, Levene o Bartlett debe llevarse a cabo antes de cualquier análisis inferencial (Pausas, 2020).

### ***8.11.2. La ANOVA cruzada (de dos vías)***

El análisis de varianza (ANOVA) permite evaluar simultáneamente el impacto de varios factores, como la intensidad del fuego, el tiempo transcurrido desde el evento y el tipo de suelo, sobre una o más variables de interés. Esta técnica también facilita el estudio de las interacciones entre estos factores, siempre que se cumplan los supuestos estadísticos y se formulen adecuadamente las hipótesis. Tras identificar diferencias significativas a nivel global, se pueden llevar a cabo pruebas post-hoc, como Tukey HSD o Bonferroni, para analizar contrastes específicos entre los grupos (Dagnino, 2014).

### ***8.11.3. Los métodos no paramétricos***

Son metodologías que surgen como alternativas de mayor robustez cuando los supuestos de las metodologías paramétricas no se cumplen, como en el caso de datos edáficos postincendio que se caracterizan por tener alta variabilidad, outliers y no cumplir con una normalidad que es favorable a transformaciones. En el caso de comparaciones entre dos grupos (e.g., quemado vs. control), la prueba U de Mann-Whitney es mascaradamente eficiente en detectar diferencias en el nivel medio, mientras que en múltiples grupos se usa Kruskal-Wallis con comparaciones post-hoc utilizando test de Dunn con p-valores para detectar diferencias entre grados de severidad o tiempo (Torres, 2020).

### ***8.11.4. Software Infostat***

El software InfoStat proporciona un sistema analítico integrado enfocado en resolver problemas específicos, como el análisis de datos ambientales y estudios ecológicos postincendio, lo cual exige un enfoque interdisciplinario de posgrado. La interfaz de usuario amigable del sistema en español amplía aún más su uso en entornos latinoamericanos, complementado por sus posibilidades de importación y exportación que permiten una interacción fluida con Excel, SPSS, R, entre otros (Ysla et al., 2023). Contiene una gran cantidad de investigación exploratoria (estadísticas descriptivas, distribuciones y diagramas de caja) a través de pruebas de inferencia parametrizadas (ANOVA, regresión y correlación) y sus alternativas no paramétricas (Mann-Whitney, Kruskal-Wallis, Friedman).

## **8.12. El Contexto del Cerro Putzalahua**

### **8.12.1. Características ecológicas**

El Cerro Putzalahua se encuentra al sur de Cotopaxi en Ecuador. El cerro constituye un ecosistema andino de gran valor cultural y ecológico, pues se ubica a 3,523 metros sobre el nivel del mar a manera de un hito paisajístico dentro del interandino ecuatoriano. Esta región de volcanes constituye un ecotono natural entre los bosques montanos y los páramos altoandinos. Se encuentra dividido en una serie de microhábitats que bordean por diferentes niveles de altitud, forma geográfica, y clima. El tipo de clima de la zona es mesotérmico con temperaturas medias anuales que rondan entre los 8 °C – 12 °C. Tiene precipitaciones que oscilan entre 600 - 900 mm anuales repartidas bimodalmente y con temperaturas diarias que pueden sobrepasar los 20 °C, además de neblina constante que incrementa significativamente los recursos hídricos interceptados, especialmente en las exhalaciones orientales que son expuestas a los aires amazónicos (Mora, 2020).

### **8.12.2. Tipo de ecosistema.**

La región de Cerro Putzalahua tiene en su mayor parte un ecosistema de páramo herbáceo y arbustivo que se encuentra entre los 3,000 y 4,000 metros sobre el nivel del mar. Entre las características más importantes de este terreno se encuentran la predominancia de estratos herbáceos, los cuales están dominados por gramíneas amacolladas de géneros Calamagrostis, Festuca y Stipa la cual forman densos patrones con múltiples especies como almohadillas (Azorella, Plantago rígida) y Espeletia (conocida localmente como frailejón) rosetas gigantes (Ramos *et al.*, 2021). La diversidad florística que a pesar de no ser comparable a ecosistemas tropicales de menor altitud, poseen una rica adaptabilidad a condiciones ecotonales específicas, presentando cerca de un 35-40% de endemismo regional en familias como Asteraceae, Ericaceae y Orchidaceae reflejando la riqueza de procesos evolutivos asociados al aislamiento ecológico en las “islas” altitudinales andinas (Cisneros *et al.*, 2024).

### **8.12.3. Posible Vulnerabilidad de los Suelos Locales a los Incendios**

Los suelos de Cerro Putzalahua son vulnerables a daños estructurales por incendios forestales debido a sus características ándicas distintivas, particularmente sus altos niveles de materia orgánica mineralizada incompletamente, los Andosoles y suelos ándicos contienen del 15 al 30% de carbono orgánico en los horizontes superiores, que se ha acumulado a lo largo de

milenios bajo condiciones de baja temperatura debido a la descomposición fría y lenta, Cuando los suelos son sometidos a temperaturas superiores a 200-250°C durante incendios de intensidad moderada a alta, los procesos de combustión y pirólisis que pueden ocurrir podrían eliminar hasta el 60-80% del carbono orgánico superficial, cambiando irreversible propiedades emergentes como la estructura, capacidad de retención hídrica y estabilidad de agregados (Reyes & Balcázar, 2021).

Los incendios perturbaban estos mecanismos de múltiples formas, incluyendo destrucción de materia orgánica esquelética, colapso de macroporos debido a la reorganización de gránulos y, lo más importante, desarrollo de hidrofobicidad debido a compuestos orgánicos volátiles que se ocluyen por combustión incompleta. Se ha documentado que incendios severos resultan en reducciones superiores al 40% de la infiltración y la capacidad de almacenamiento de agua en páramos andinos similares, con períodos de recuperación que superan de 8 a 12 años (Zamora et al., 2022).

El ciclo de nutrientes, especialmente el nitrógeno y el fósforo, se ve afectado profundamente como resultado de la vulnerabilidad bioquímica de estos suelos paramunos que sufren por el fuego. El nitrógeno, que se conserva principalmente en formas orgánicas estables (95-98% del N total), sufre pérdidas masivas mediante volatilización durante la quema, resultando en una pérdida del 60-85% de nitrógeno contenido en los horizontes superficiales a temperaturas de 200 grados Celsius.

El fósforo, que frecuentemente es limitante en los ecosistemas dados debido a la fijación excesiva en complejos con aluminio y hierro asociados al alofano, sufre dinámicas complejas de liberación inicial restringida por degradación térmica de la mineralización seguida de reacciones de inmovilización con óxidos metálicos revelados tras la combustión de material orgánico protector, es decir, alteraciones dinámicas (Farfán et al., 2020).

### **8.13. Normativa calidad del suelo**

La gestión, el control, y la prevención de incendios en Ecuador incumben la protección y restauración de los suelos afectados. Dichas tareas se incluyen y enmarcan dentro de un sistema que empieza de forma escalonada en la base, desde principios constitucionales hasta las normativas técnicas específicas.

**8.13.1. Acuerdo Ministerial 097-A. Anexo 2, norma de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados.**

**a) Muestreo y análisis de suelos**

4.5.1 De la toma de muestras para caracterización de suelos 4.5.1.1 Se tomará una muestra compuesta por cada 100 hectáreas, formada por 15 a 20 submuestras georreferenciadas, cada una con un peso no inferior a 0.5 kg tomadas a una profundidad entre 0 a 30 cm. Las submuestras serán mezcladas y homogenizadas para obtener una muestra compuesta representativa del suelo, de la cual se tomará un peso de entre 0.5 y 1.0 kg, que servirá para realizar los análisis requeridos. Para los proyectos, obras o actividades menores a 100 hectáreas, se tomará una muestra compuesta bajo las condiciones detalladas en el párrafo que antecede. Para ejecutar el muestreo, se trazará una cuadrícula sobre el área del proyecto, y dentro de ella se tomarán las submuestras de forma aleatoria hasta completar el número señalado.

En caso de existir diversidad de tipos de suelo, se tomará una muestra compuesta para cada uno de los tipos presentes en el área, de acuerdo a las condiciones antes señaladas. La toma de muestras será efectuada por un laboratorio acreditado por el Servicio de Acreditación Ecuatoriano o el que lo reemplace (MAATE, 2015).

**8.13.2. Artículo 14, Constitución de la República del Ecuador (2008)**

En el Artículo 14, de la Constitución de la República del Ecuador (2008), se reconoce “el derecho de la población a vivir en un ambiente sano ecológicamente equilibrado que garantice la sostenibilidad y el Sumak kawsay” lo que catapulta los intereses del país como “la preservación del medio ambiente, la conservación de los ecosistemas, la diversidad biológica, la integridad del patrimonio genético del país, y la prevención del daño ambiental; mezcla que realiza las intenciones de recuperar los espacios degradados que son considerados como márgenes naturales por el país”.

**8.13.3. El Artículo 409 de la Constitución de la República del Ecuador (2008)**

El Artículo 409 de la Constitución de la República del Ecuador (2008), señala “el interés público y prioridad de la nación”, acotando como tal la “conservación del suelo, en especial su capa fértil.” Lo que modifica el marco de la legislación por la falta de normativas de protección y control derivados de la sobreexplotación junto contaminación, desertificación y erosión, los principios constitucionales se fundamentan en el pionero reconocimiento de los derechos de la

naturaleza Artículos 71-74 de la Constitución de la República del Ecuador (2008), que otorga al suelo, como un componente fundamental del ecosistema, el derecho a tener su existencia, mantenimiento y regeneración de ciclos de vida, estructuras y evolución de procesos, integrados y respetados.

#### ***8.13.4. Código Orgánico del Ambiente (2017)***

El Código Orgánico del Ambiente (2017) proporciona jurisprudencia autoritaria que contiene los sistemas de gestión administrativa de planificación territorial y paisajística basados en principios sistémicos de ecología. El Código Orgánico del Ambiente (2017) proporciona mecanismos de custodia directa en su Título V, Capítulo II, donde se definen obligaciones estatales y privadas para prevenir la degradación utilizando instrumentos de planificación, monitoreo y control.

#### ***8.13.5. Artículo: 100 del Código Orgánico del Ambiente (2017)***

Respecto a los incendios forestales, en el Art. 100 del Código Orgánico del Ambiente (2017), se establecen infracciones graves contra la biodiversidad, incluyendo “provocar incendios en ecosistemas naturalizados”, el infractor de tales disposiciones se somete a severas acciones legales punitivas de multas monetarias sustanciales, así como a medidas obligatorias de restauración de los daños infligidos. Tal regulación se complementa con el Reglamento al Código Orgánico del Ambiente (2019), que desarrolla aspectos operativos de los sistemas de gestión de prevención y reacción ante incendios, incluyendo sistemas periféricos obligatorios, protocolos de respuesta interinstitucional, y órdenes de restauración de áreas específicas con un enfoque principal en la recuperación de servicios ecosistémicos prioritarios, incluyendo explícitamente la protección del suelo y regulación hidrológica.

#### ***8.13.6. Norma Técnica para Evaluación y Valoración de Datos por Incendios Forestales (2015)***

De manera complementaria, la Norma Técnica para Evaluación y Valoración de Daños por Incendios Forestales (2015), proporciona de manera sistemática cómo establecer impactos sobre los distintos componentes ecosistémicos incluyendo valoraciones específicas sobre la alteración edáfica, algo tan crítico que no se puede eludir en la determinación de compensaciones y medidas de restauración.

### 8.13.7. Plan Nacional de Restauración Forestal (2019)

El marco legal específico para las medidas de protección y la acción restaurativa de suelos en un contexto post-incendio está integrado con las políticas del sector de conservación del suelo y manejo de tierras. El Plan Nacional de Restauración Forestal (2019), establece directrices técnicas para la recuperación de áreas degradadas, con protocolos particulares para zonas impactadas por incendios que priorizan la estabilización emergente para controlar la erosión mediante técnicas de bioingeniería, seguidas de la siembra de vegetación con especies nativas seleccionadas para mejorar las propiedades edáficas.

## 9. VALIDACIÓN DE LAS HIPÓTESIS

En la Tabla 3 se describen las hipótesis nulas y alternativas para cada factor.

**Tabla 3.** Hipótesis estadísticas planteadas

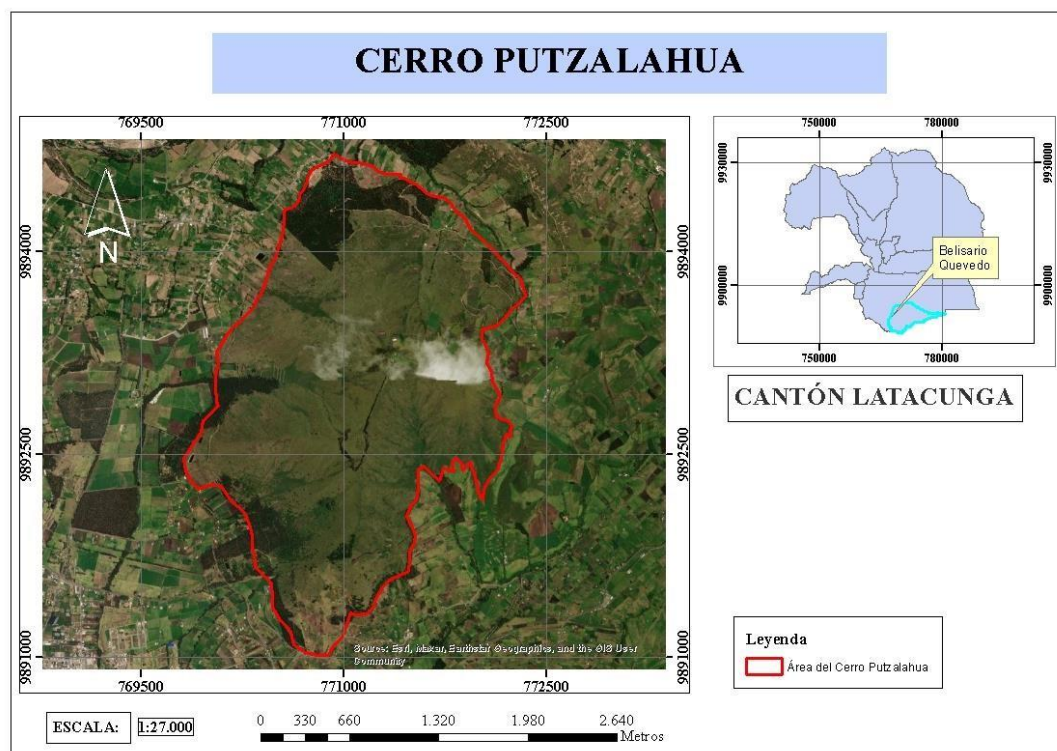
N.º	Factor	Hipótesis nula ( $H_0$ )	Hipótesis alternativa ( $H_1$ )
1	Condición del suelo no afectado.	$H_{0(1)}$ = No existen diferencias significativas entre suelo afectado y no suelo afectado.	$H_{1(1)}$ = Sí existen diferencias significativas entre suelo afectado y no afectado.
2	Profundidad	$H_{0(2)}$ = No existen diferencias significativas entre los niveles de profundidad del suelo (0–15 cm vs. 15–30 cm). $H_{1(2)}$ = Sí existen diferencias	$H$ significativas entre los niveles de profundidad del suelo.
3	Interacción	$H_{0(3)}$ = No hay interacción significativa	$H_{1(3)}$ = Sí existe interacción significativa entre condición del suelo y profundidad.

Nota: Las hipótesis planteadas corresponde a un diseño bifactorial que considera la condición del suelo y dos niveles de profundidad. La hipótesis de interacción evalúa si el efecto incendio varía según la profundidad. Fuente: Elaboración propia

## 10. ÁREA DE ESTUDIO

El cerro Putzalagua, también conocido como “cerro de agua” e incluso “volcán de lodo” por muchos, es una hermosa elevación que se alza firmemente en las laderas de la parroquia de Belisario Quevedo, a solo unos quince minutos de la ciudad de Latacunga (Heredia et al., 2021). Esta elevación de origen volcánico alcanza los 3.523 metros sobre el nivel del mar y presenta una forma cónica característica. El área se distingue por su riqueza en biodiversidad, albergando

especies nativas de flora y fauna propias del ecosistema altoandino. Su cercanía a la ciudad de Latacunga, así como su valor ecológico, lo convierten en un sitio prioritario para el monitoreo ambiental y la conservación de los servicios ecosistémicos asociados al páramo de alta montaña.



**Figura 1.** *Ubicación del Cerro Putzalahua*

**Elaborado por:** *Autores*

## 11. METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL

El estudio adoptó un enfoque semicuantitativo, integrando mediciones de propiedades fisicoquímicas del suelo en campo y laboratorio. Se utilizaron métodos estandarizados como pHmetro para el pH, la pasta saturada para la CE, la calcinación para MO, kit portátil LAQUAtwin para K, Ca y Na, y el método del hidrómetro para d

eterminar la textura y análisis paramétrico ANOVA donde se buscó entender, numéricamente, cómo varían estas propiedades. El estudio, con un fuerte carácter experimental, permitió la comparación estadística de los resultados entre suelos impactados y bajo influencia directa del fuego. Además, se investigó si la profundidad de muestreo y la condición postmuestreo, por ejemplo, afectan los resultados del análisis, mediante pruebas paramétricas y no paramétricas, con el fin de identificar diferencias significativas.

## **11.1. Fases de investigación**

### ***11.1.1 Investigación de campo***

El equipo de investigación visitó el cerro Putzalahua, situado en la parroquia Belisario Quevedo. Esto es una excursión de campo. Los costos fueron asumidos por los propios participantes para que los recursos se utilizaran al máximo posible. La cantidad de muestras recolectadas se estableció de acuerdo con el Acuerdo Ministerial 097-A, para cumplir con los requisitos técnicos actuales. Después de una recolección exitosa, se siguió una adecuada preservación para garantizar que los especímenes estuvieran en buenas condiciones al llegar al laboratorio para su análisis.

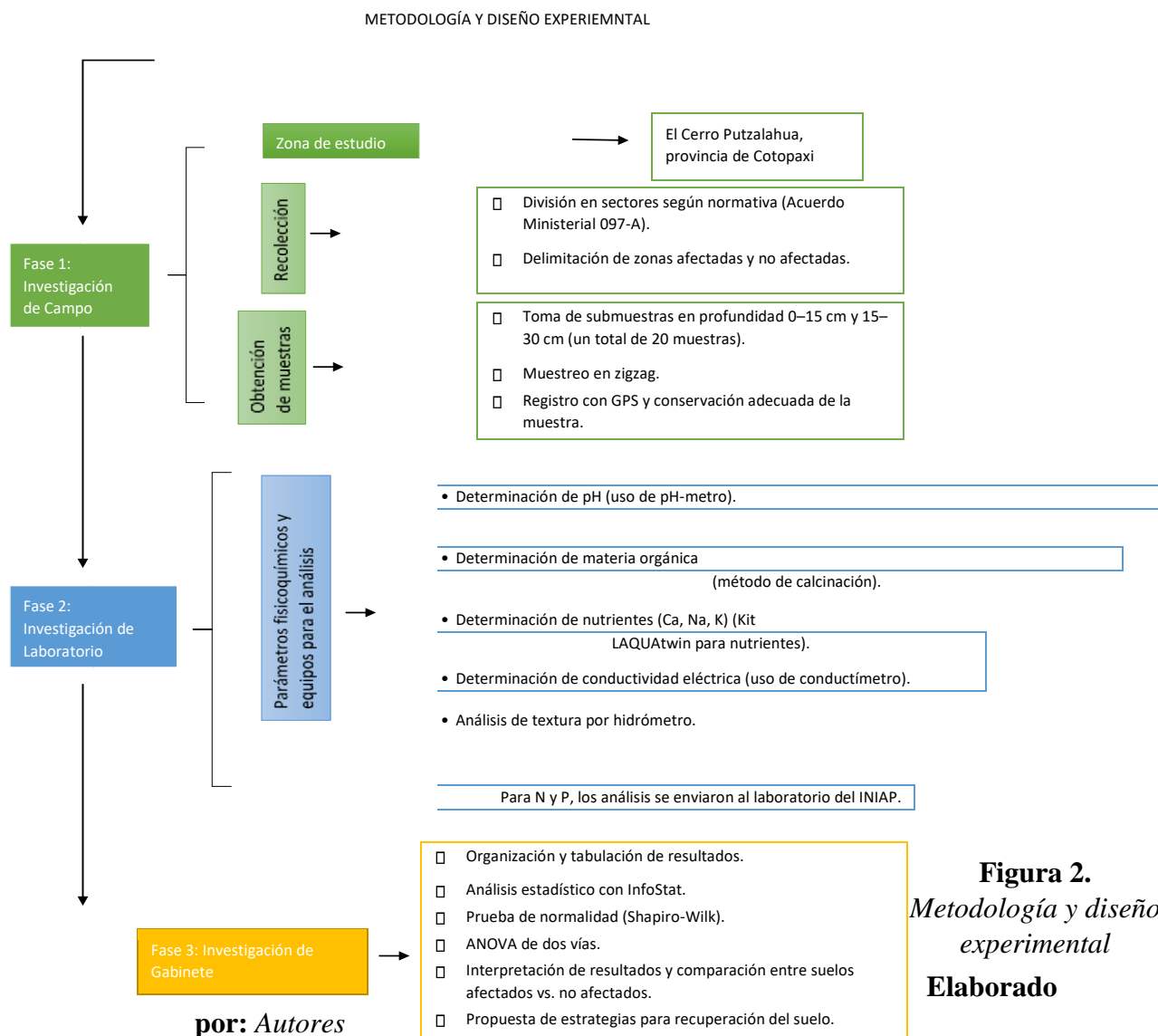
### ***11.1.2. Investigación de laboratorio***

En la segunda etapa, se realizaron pruebas de laboratorio para evaluar las propiedades fisicoquímicas del suelo del mismo sitio, el Cerro Putzalahua. Las muestras, preclasificadas según su condición y la profundidad (0–15 cm y 15–30 cm), se prepararon de acuerdo con los procedimientos estandarizados. El pH se determinó utilizando un pHmetro; la materia orgánica por calcinación, y la conductividad eléctrica utilizando un conductímetro. Además, los niveles de nutrientes como Ca, Na, y K se determinaron utilizando kits LAQUAtwin y el método del hidrómetro para determinar el nivel de textura. Las muestras de parámetros de nitrógeno y fósforo se enviaron al laboratorio del INIAP en Quito. Este procedimiento fue necesario para separar las alteraciones causadas por el fuego; la información será crítica para la interpretación de la degradación del suelo y la planificación de futuras estrategias de rescate. Cada análisis representó una lectura minuciosa de la memoria física y química del suelo posterior al incendio.

### ***11.1.3. Investigación de gabinete***

Después de realizar el análisis, se recopilaron y organizaron los resultados obtenidos durante la investigación. Dado que los datos son cuantitativos, se utilizó el software InfoStat para procesarlos los cuales fueron presentados en tablas, diagramas y curvas que permitieron distinguir diferencias significativas entre las localidades de estudio. Además, se propusieron estrategias de recuperación para restaurar el estado de calidad del suelo y permitir un mejor monitoreo de futuras intervenciones.

A continuación, en la Figura 2 se indica una síntesis de las fases de metodología y diseño experimental.



## 11.2. Metodología para el Primer Objetivo

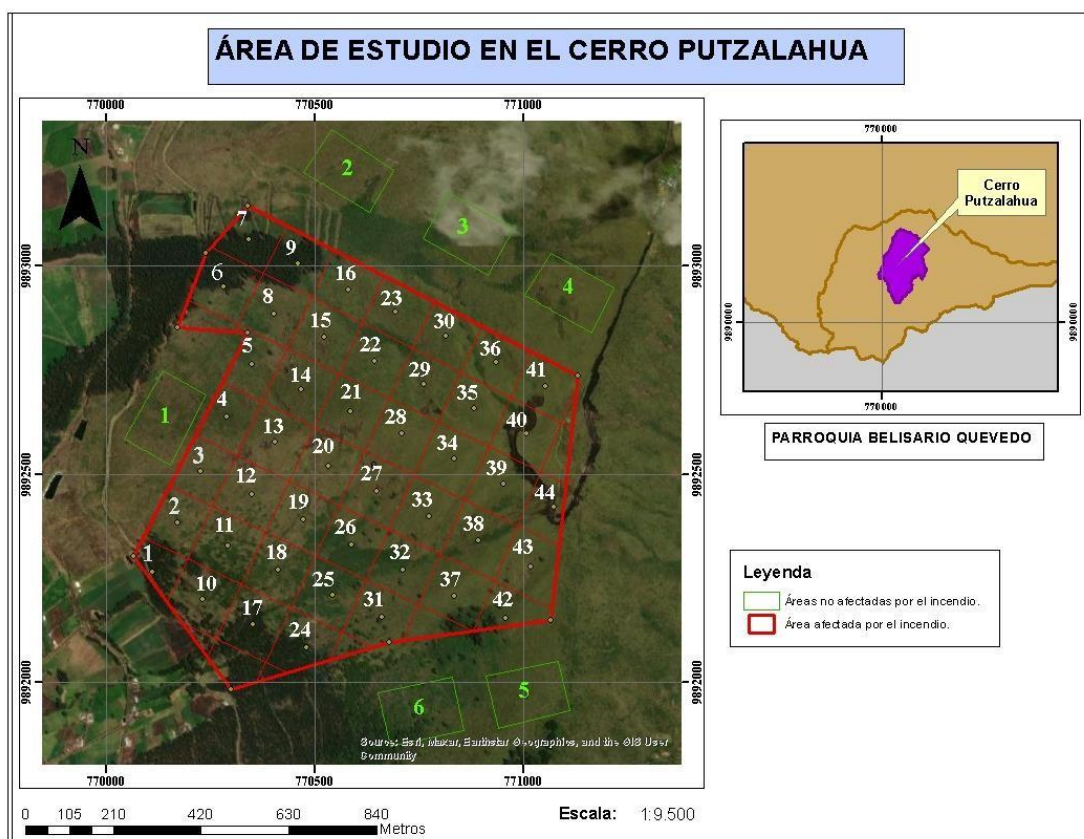
### 11.2.1. Trabajo de campo

#### a) Selección de áreas de muestreo

Se emplearon herramientas de geolocalización, basadas en Sistemas de Información Geográfica (SIG), para la elección de las dos zonas donde se realizó la caracterización de los parámetros fisicoquímicos del suelo. Tales sistemas facilitaron la delimitación precisa de las áreas involucradas. Para el área afectada se dará prioridad a las áreas con cambios evidentes en la condición de las plantas o cambios visibles en la superficie del suelo. Para el área no afectada,

se eligen sectores adyacentes con condiciones idénticas de pendiente, vegetación y tipo de uso del suelo con el fin de establecer una base de comparación técnicamente válida y representativa.

En cuanto al área de muestreo para la zona afectada, se dividió la tierra en cuatro áreas para lograr una fracción más representativa del suelo alcanzado por el incendio forestal, tomando muestras compuestas representativas de ellas. Por otro lado, se seleccionó un área intacta representativa observando alrededor del área quemada y teniendo en cuenta características similares para el grado de pendiente, vegetación y uso del suelo. Se identificaron seis sectores similares de los cuales se obtuvieron muestras compuestas de manera similar.



**Figura 3. Área afectada por el incendio**

**Elaborado por: Autores**

En cuanto a la metodología empleada para el muestreo de suelos afectados en el cerro Putzalahua, es importante aclarar que, aunque el Acuerdo Ministerial 097-A establece una fórmula estándar para determinar el número mínimo de puntos de muestreo en suelos contaminados, en este estudio se optó por una adaptación metodológica. Esta decisión se tomó considerando las características particulares del ecosistema y las condiciones propias de un área afectada por un incendio forestal, ocurrido cinco años atrás.

Según lo dispuesto en el Anexo 2 del Acuerdo Ministerial 097-A, el cálculo convencional para definir la cantidad mínima de puntos de muestreo sigue la expresión:  $Y = (X)^{0.3} \times 11.71$ , donde “Y” representa el número de puntos necesarios y “X” la superficie del área en hectáreas (MAATE, 2015).

$$Y = (X)^{0.3} \times 11.71 \quad (1)$$

$$Y = (80.78)^{0.3} \times 11.71$$

$$Y = 43.72$$

$$Y \approx 44$$

Aplicando esta fórmula al área total (zona quemada) del cerro Putzalahua (80.78 hectáreas), se obtendría un estimado de 44 puntos de muestreo. Sin embargo, esta referencia está pensada para suelos con contaminación química reciente o sitios industriales, condiciones que no reflejan la realidad actual del páramo evaluado.

Ante esta situación, y dado que el objetivo del estudio fue analizar la calidad fisicoquímica del suelo en áreas con signos visibles de alteración, se implementó un esquema de muestreo sectorizado (zonas rojas en la Figura 3). Con base en este diseño, se recolectaron submuestras en 44 puntos distribuidos en el área afectada. Estas submuestras fueron agrupadas y homogenizadas, obteniéndose finalmente 8 muestras compuestas, tomadas a dos profundidades distintas en cada sector.

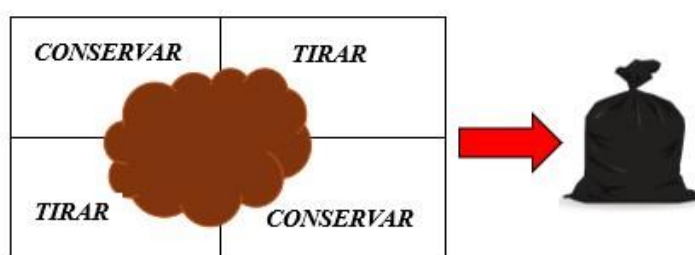
Esta estrategia se basó en observaciones de campo, donde se constató que gran parte del terreno había iniciado procesos naturales de regeneración vegetal (Cheng et al., 2024), mientras que solo en algunos sectores persistían evidencias del incendio, como troncos calcinados, manchas de suelo ennegrecido y áreas parcialmente desprovistas de cobertura vegetal.

El área no afectada, por su parte, fue delimitada a partir del entorno inmediato de la zona incendiada (zonas verdes en la Figura 3). Se identificaron seis sectores con condiciones similares en pendiente, cobertura vegetal y uso de suelo. En cada uno de estos se tomaron submuestras, para formar 12 muestras representativas también a profundidad controlada, manteniendo la aleatoriedad como criterio base. Esta distribución permitió realizar

comparaciones directas entre suelos afectados y no afectados, a fin de identificar posibles alteraciones fisicoquímicas como consecuencias del incendio.

### 11.2.2. Muestreo

Cada submuestra tuvo un peso no menor a 0,5 kg, lo que sumó un total entre 7,5 y 10 kg (MAATE, 2015). Posteriormente, se aplicó el método del cuarteo, que permitió reducir progresivamente la cantidad de suelo hasta obtener un volumen adecuado para su análisis en laboratorio. En este proceso, se conservaron las muestras compuestas con un peso aproximado de entre 0,5 y 1 kg, asegurando que fueran representativas de los sitios de muestreo.



**Figura 4. Método de cuarteo**  
Elaborado por: Autores

De este modo, se buscó un equilibrio entre los criterios normativos establecidos en el Acuerdo Ministerial 097-A y las recomendaciones técnicas para un manejo práctico y eficiente en campo.

### 11.2.3. Técnica

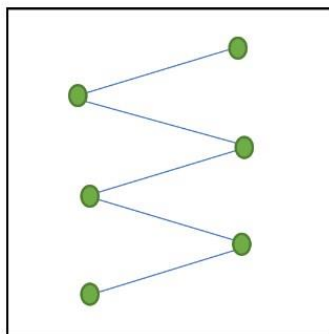
#### a) Técnica muestreo de superficie

Se realizó un muestreo superficial del suelo, mediante la toma de muestras compuestas a dos profundidades: de 0 a 15 cm (capa superficial) y de 15 a 30 cm (capa subsuperficial). Esta técnica fue aplicada tanto en los suelos afectados como en los no afectados por el incendio, las cuales evidencian que los efectos térmicos y químicos del fuego se concentran principalmente en los primeros 15 cm del perfil del suelo (Rodríguez et al., 2024). Esto, es aplicado para las dos técnicas para muestrear los suelo afectados y no afectados por el incendio.

#### b) Recorrido en zigzag

Para las zonas que no fueron afectadas por el incendio, se caminó entre 25 a 30 pasos formando líneas cruzadas, se procedió a recolectar las muestras de forma que cada muestra sea

representativa. Es un método aplicado en suelos homogéneos y en cultivos anuales, pastos (Mendoza & Espinoza, 2017).



**Figura 5.** *Recorrido zigzag*  
**Elaborado por:** *Autores*

Finalmente, se procedió a guardar las muestras compuestas con una ficha en la que se identificaron la fecha del muestreo y el nombre de la muestra. Sin olvidar el previo establecimiento de parámetros para todas las muestras.

#### **11.2.4. Materiales y equipos**

Los materiales y equipos utilizados para el muestreo se presentan en la Tabla 3

**Tabla 4.** *Materiales para el Muestreo*

<b><i>Materiales y equipos</i></b>
<i>Fundas Ziploc</i>
<i>Balanza de mapo</i>
<i>Muestras de suelo</i>
<i>Cooler</i>
<i>Cuerdas</i>
<i>GPS</i>
<i>Pala</i>
<i>Regla</i>
<i>Estacas</i>

Nota: La tabla representa los materiales y equipos empleados para el muestreo sistemático de suelos en campo, conforme al diseño metodológico del estudio. Fuente: Elaboración propia (2025)

### 11.3. Metodología para el Segundo Objetivo

#### 11.3.1. Análisis de laboratorio

##### a) Análisis Químico:

- Determinación de pH
- Determinación N, P, K, Ca y Na - Materia orgánica
- Determinación conductividad eléctrica
- Análisis de textura

##### b) Análisis Físico:

#### 11.3.2. Proceso de Análisis de los Parámetros Químicos en Laboratorio:

##### a) Determinación de PH

Para su determinación en laboratorio, se empleó un potenciómetro siguiendo el método estándar que utiliza una relación suelo-agua de 1:2,5. Esta proporción permitió obtener una suspensión homogénea adecuada para la medición precisa del pH, conforme al procedimiento descrito por (Vásquez, 2022):

##### a.1. Materiales

**Tabla 5.** *Materiales y equipos para determinar pH*

Materiales	Equipos
Vasos de precipitación 50 ml	Agitador magnético
Probeta 50ml	Balanza de precisión
Pipeta	pH metro
Tamiz de 2mm	
Piseta	
Espátula	
Papel filtro	
Imanes	
Agua destilada	

Nota: La tabla presenta los materiales y equipos empleados en la medición del pH del suelo mediante potenciómetro, utilizando la relación suelo-agua de 1:2,5. Fuente: Elaboración propia (2025)

## a.2. Procedimiento

1. Se preparó una solución acuosa con la muestra de suelo, donde en un vaso de precipitación se coloca 20g de la muestra.
2. Se añadió 50 ml de agua destilada usando una pipeta volumétrica, con ayuda de una varilla se agitó la solución hasta homogenizar.
3. Luego, se dejó en reposo 15 min para volver a agitarla, se realizó ese proceso durante una hora.
4. Para tomar la medida, la muestra se colocó sobre un agitador magnético, a una velocidad constante y baja para no generar burbujas ni alguna alteración.
5. Posteriormente, se lavó el pH metro con agua destilada y se secó con un pañuelo (tela liza). Con una pipeta se toma un poco del líquido superficial, sin que toque el fondo del vaso.
6. Se colocó unas gotas en el equipo, posteriormente se pulsó medir y se esperó hasta que la lectura deje de fluctuar antes de su registro.
7. Finalmente, el pH metro se lavó con agua destilada y se secó con un pañuelo.

La tabla 5 presenta los rangos de pH, que son utilizados para la comparación de los resultados que se obtienen después del análisis en laboratorio:

**Tabla 6. Rangos para pH**

<b>Evaluación del pH</b>	
$\leq 4.5$	Extremadamente ácido
4.5 – 5.0	Muy fuertemente ácido
5.1 – 5.5	Fuertemente ácido
5.6 – 6.0	Medianamente ácido
6.1 – 6.5	Ligeramente ácido
6.6 – 7.3	Neutro
7.4 – 7.8	Medianamente básico
7.9 – 8.4	Básico
8.5 – 9.0	Ligeramente básico
9.1 – 10.0	Alcalino
$\geq 10.0$	Fuertemente alcalino

Nota: Rangos de pH utilizados para la interpretación de resultados según Porta, (2019).

### ***b) Determinación de la Materia Orgánica (MO) por calcinación***

Para su cuantificación, se aplicó el método de calcinación, el cual se basa en la determinación de la pérdida de peso de una muestra previamente secada, tras ser sometida a altas temperaturas en un horno mufla. Esta técnica, descrita por Aguilar (2019), permite estimar de manera indirecta el contenido de materia orgánica al asumir que dicha pérdida corresponde, en su mayor parte, a la combustión de los compuestos orgánicos presentes en el suelo. **b.1.**

#### **Materiales**

En la siguiente tabla 6 se muestran los materiales y los reactivos que fueron utilizados para la determinación de la materia orgánica.

**Tabla 7. Materiales y equipos para determinar MO**

<b>Materiales</b>	<b>Equipos</b>
Tamiz 2mm	Estufa de secado
Capsulas de porcelana de 50ml	Mufla
Pinzas Metálicas	Desecador con gel de sílice
Espátula	
Guantes térmicos	
Papel aluminio	
Balanza analítica	

Nota: La tabla presenta los materiales y equipos empleados en el procedimiento de calcinación en mufla para la determinación del contenido de materia orgánica. Fuente: elaboración propia (2025).

#### **b.2. Preparación de la muestra**

1. Se pesaron 100 g de suelo y se tamizó a 2 mm.
2. Los 100 gr de suelo tamizado se introdujeron en la estufa a 105 °C durante 24 horas. (Este paso permitió eliminar la humedad del suelo, asegurando que la pérdida de peso se atribuya únicamente a la materia orgánica).
3. Si en caso que la muestra haya sido recogida con anterioridad y haya sido expuesta al aire libre por más de 24 horas no se debe someter la muestra a la estufa ya que eso puede alterar el porcentaje de materia orgánica.

### b.3. Preparación de los crisoles

1. Los crisoles de 50 ml se introdujeron a la mufla durante 2 horas a una temperatura de 430 °C eliminando su humedad.
2. Con el uso de guantes térmicos y pinzas metálicas se sacaron los crisoles de la mufla.
3. Se colocaron los crisoles directo al desecador hasta que alcancen la temperatura ambiente.
4. A continuación, se pesaron los crisoles en la balanza analítica y así se estableció el peso del crisol. Y posteriormente se anotó el peso de cada crisol.
5. Finalmente se señaló un lápiz cada crisol porque cada uno tiene su propio peso.

### b.4. Procedimiento

1. Posteriormente, en los crisoles se pesaron 5 gr de suelo en la balanza analítica, de los 100gr de suelo tamizado y secado a 105 °C dentro de la estufa.
2. Luego, se colocó los crisoles con los 5 gr de suelo dentro de la mufla a 430 °C por 2hrs.
3. Transcurrido el tiempo, con ayuda de los guantes térmicos y las pinzas metálicas se sacaron los crisoles con la muestra y fue colocada en el desecador para que alcance la temperatura ambiente.
4. Finalmente, se pesó de nuevo y se anotó el peso final de la muestra a 430 °C.

### b.5. Fórmula

$$\text{Peso a } 105^{\circ}\text{C (gr)} = \text{Peso crisol (gr)} + \text{Peso suelo seco(gr)} \quad (2)$$

$$\% \text{ materia orgánica} = \frac{(\text{Peso a } 105^{\circ}\text{C (gr)} - \text{Peso a } 430^{\circ}\text{C (gr)})}{\text{Peso a } 430^{\circ}\text{C (gr)}} * 100 \quad (3)$$

**Donde:** El peso a 430°C (gr) es la pérdida de peso que sufra la muestra de suelo en la mufla, corresponde únicamente a la calcinación de la materia orgánica.

## b.6. Rangos para la interpretación de datos para MO

Para facilitar la interpretación de los valores cuantitativos obtenidos en el análisis de materia orgánica, se utiliza la Tabla 7, se representa rangos de referencia categorizados como bajo, medio y alto.

**Tabla 8.** *Porcentajes de MO*

Contenido %	Categoría	Puntuación
< 1.0	Bajo	0
1.0-3.0	Medio	1
> 3.0	Alto	2

Nota: Rangos de interpretación del contenido de materia orgánica en suelos, clasificados según su porcentaje en bajo, medio y alto. Fuente: Pina & de Armas (2015).

El suelo puede clasificarse como de baja, media o alta cantidad de materia orgánica. Estos datos son críticos para hacer un diagnóstico del estado del suelo, ya que el contenido de materia orgánica está estrechamente relacionado con la salud, fertilidad y potencial regenerativo de los suelos.

### c) *Análisis de nutrientes ( $Ca^{2+}$ , $K^+$ , $Na^+$ )*

Para su medición, se empleó un enfoque instrumental basado en el uso del kit portátil LAQUAtwin, el cual opera con electrodos selectivos de iones y permite obtener resultados de manera precisa. Según la metodología descrita por HORIBA (2021), las muestras fueron extraídas con una solución de acetato de amonio 1 M, y posteriormente analizadas con el equipo portátil.

#### c.1. Materiales

**Tabla 9.** *Materiales, reactivos y equipos para determinar nutrientes*

Materiales	Reactivos	Equipos
Vasos de precipitación 100ml	Cloruro de amonio (en lugar de acetato de amonio)	Balanza analítica
Matraz aforado		Agitador magnético
Papel filtro		Kit LAQUAtwin para nutrientes

Nota: La tabla presenta los elementos utilizados en el procedimiento de extracción y lectura instrumental de los nutrientes calcio, potasio y sodio. Fuente: Elaboración propia (2025).

#### c.2. Procedimiento

1. Se tamizó el suelo con el tamiz de 2 mm, luego se pesó 10 g y se colocó en un vaso de precipitación (relación suelo: solución extractante = 1:5).
2. Se agregó 50ml del cloruro de amonio 1N (se midió 2.67g de  $\text{NH}_4\text{Cl}$  y se disolvió con agua destilada hasta completar los 50 ml).
3. Se mezcló con ayuda del agitador magnético durante 30 minutos para liberar los nutrientes solubles.
4. Se dejó reposar 10 minutos y posteriormente se filtró la muestra utilizando un embudo formado con papel filtro
5. El extracto obtenido tras la filtración fue utilizado para la medición de los nutrientes mediante el kit portátil

### c.3. Rangos de interpretación de datos para nutrientes del suelo.

La siguiente tabla 9 establece los rangos de referencia utilizados para interpretar los niveles de potasio (K), calcio (Ca) y sodio (Na) obtenidos en las muestras de suelo. Los valores se categorizan en tres niveles: bajo, medio y alto, según la concentración del nutriente.

**Tabla 10.** Rangos para la interpretación de nutrientes

Nutrientes	Niveles en $\mu\text{g/ml}$			Interpretación
	Bajo	Medio	Alto	
Potasio (K)	<76	76-150	>150	Bajo: puede haber deficiencia. Medio: adecuado para cultivos. Alto: buen nivel, puede influir en absorción de otros nutrientes si es muy alto.
Calcio (Ca)	< 41	41-140	>140	Bajo: afecta estructura del suelo y salud de plantas. Medio: óptimo. Alto: adecuado, pero puede alterar equilibrio de otros nutrientes.
Sodio (Na)	<16 cmol/kg o meq/100gr	16-30 cmol/kg o meq/100gr	>31 cmol/kg o meq/100gr	Bajo: no hay problema. Medio: precaución, revisar salinidad. Alto: riesgo de salinización y deterioro de estructura del suelo.

Nota: Rangos de concentración utilizados para clasificar los niveles de potasio (K), calcio (Ca) y sodio (Na) en bajo, medio o alto, conforme a parámetros de fertilidad del suelo. Adaptado de *iniap(sc635.65E17p12.pdf*, s. f.).

Esta categorización permite una evaluación conjunta del estado nutricional del suelo, así como el diagnóstico de si se alcanzarán deficiencias, niveles óptimos o toxicidades en caso de influencias en la disponibilidad de otros nutrientes, o salinidad o estructura del suelo. Donde el sodio está involucrado, se añade una advertencia específica, ya que está directamente relacionado con el proceso de salinización del suelo después de un incendio. Los valores indicados están respaldados por parámetros técnicos confirmados en la literatura especializada con respecto al análisis de la fertilidad del suelo y el impacto ambiental.

#### ***d) Determinación de N y P***

Se recogieron dos muestras en el área afectada por los incendios forestales y dos en el área de control (no afectada por los incendios forestales), con el fin de comparar las condiciones entre ambas. Estas muestras fueron enviadas al laboratorio del INIAP para análisis de nitrógeno total y fósforo disponible, a fin de determinar posibles cambios en la disponibilidad de N y P con el objetivo de evaluar posibles cambios en la disponibilidad de estos elementos derivados de la acción del fuego.

### ***11.3.3. Proceso de Análisis de los Parámetros Físicos en Laboratorio***

#### ***e) Determinación de la conductividad eléctrica (CE)***

En laboratorio, la determinación se llevó a cabo mediante la preparación de un lodo y posteriormente se utilizó un conductímetro. El procedimiento adoptado siguió los protocolos propuestos por (Vásquez, 2022), quien obtuvo resultados confiables.

#### **e.1. Materiales**

**Tabla 11.** *Materiales y equipos para determinar CE*

<b>Materiales</b>	<b>Equipos</b>
Vasos de precipitación	Conductímetro digital

Varilla de agitación	Bomba al vacío
Probeta graduada 50ml	
Espátula	
Tamiz 2mm	
Tarrinas plásticas con tapa	
Embudo buchner	
Matraz de Erlenmeyer	
Agua Destilada	

Nota: La tabla presenta los materiales, equipos y reactivos utilizados para la determinación de la conductividad eléctrica (CE) del suelo mediante lodo y filtración al vacío. Fuente: Elaboración propia (2025)

## **e.2. Procedimiento**

1. Se midieron 200g de la muestra de suelo y se colocaron en una tarrina plástica, a la cual se añadió agua destilada hasta formar un lodo.
2. Se agitó la muestra con una varilla para obtener una muestra homogénea, la mezcla debía presentar una textura pastosa y brillante, y al realizar un corte transversal, debía cerrarse lentamente, pero sigue se consideró válida.
3. Luego, se tapó la muestra y se dejó en reposo por 2 horas.
4. Para tomar la medida, primero se calibró el conductímetro, con una solución estándar 12,880 uS/cm.
5. Se colocó el papel filtro cortado a la medida del embudo buchner, en donde se vertió la pasta o lodo. Se conectó la bomba al vacío y se esperó el tiempo necesario para obtener el líquido filtrado.
6. Posteriormente, se lavó el conductímetro con agua destilada y se secó. Se tomó unas gotas del líquido obtenido y se colocó en el equipo. Se pulsó medir en el equipo y se esperó hasta que la lectura deje de fluctuar antes de su registro.
7. Finalmente se lavó el equipo con agua destilada y se secó con papel absorbente.

### ***f) Análisis de textura – Hidrómetro***

Se aplicó el método del hidrómetro para analizar la textura del suelo, lo que permitió cuantificar los porcentajes de arena, limo y arcilla, en función de sus velocidades de sedimentación. La técnica se basó en el procedimiento descrito por Caiza et al. (2022): **f.1.**

## **Materiales**

**Tabla 12.** *Materiales, reactivos y equipos para determinar textura*

<b>Materiales</b>	<b>Reactivos</b>	<b>Equipos</b>
2 probetas aforadas de 1L	Hexametáfosfato de sodio	Balanza analítica
Hidrómetro H152		Agitador magnético
Termómetro		
Vasos de precipitación de 1L		
Agitador de vidrio		
Imanes		
Espátula		
Tamiz 2mm		
Agua destilada		

Nota: La tabla presenta los insumos utilizados en la técnica de hidrómetro para la determinación de la textura del suelo. Fuente: Elaboración propia (2025).

## **f.2. Procedimiento**

1. La muestra de suelo fue secada al aire durante dos semanas. Posteriormente, se trituró cuidadosamente para desagregar los grumos más grandes y se tamizó para homogeneizar el material.
2. Se preparó una solución dispersante disolviendo 10 g de hexametáfosfato de sodio en 125 mL de agua destilada, utilizando un vaso de precipitación de 1 L, un agitador magnético y una barra de agitación para asegurar la disolución completa del reactivo.
3. Una vez lista la solución dispersante, se añadió la muestra de suelo (70g) y se mezcló durante 10 minutos con el agitador magnético. La suspensión obtenida se dejó en reposo por 24 horas, permitiendo una adecuada disgregación de las partículas por acción del dispersante.
4. En paralelo, se preparó una solución adicional con 30 g de hexametáfosfato de sodio en 750 mL de agua destilada, se dejó reposar el hidrómetro durante 30 minutos para su limpieza y estabilización antes del uso.
5. Luego de la dispersión inicial, se integró una segunda solución de 10 g de hexametáfosfato de sodio en 125 mL de agua destilada a la mezcla de suelo reposada. Esta nueva suspensión se agitó durante 1 minuto para asegurar la uniformidad.

6. La mezcla completa se transfirió cuidadosamente a una probeta aforada de 1 L, realizando tres enjuagues sucesivos del vaso precipitado con agua destilada, asegurando que todo el suelo pasara a la probeta hasta alcanzar el volumen final.
7. Se selló la boca de la probeta con papel film y se procedió a una agitación horizontal energética durante 1 minuto. Finalizada la agitación, la probeta se colocó en posición vertical para iniciar las mediciones.
8. El hidrómetro fue introducido con cuidado en la suspensión. A partir de ese momento, se tomaron lecturas con cronómetro a los 1, 2, 30 y 60 minutos, registrando simultáneamente la temperatura del medio con un termómetro.
9. Luego de esta primera serie de lecturas, el hidrómetro fue sumergido nuevamente en la solución de limpieza con hexametafosfato de sodio durante 30 minutos para remover posibles residuos.
10. Luego, el hidrómetro se colocó nuevamente en el tubo de ensayo con tierra y se llevó a cabo la segunda fase de medición con el registro de resultados a los 120, 180, 240, 300, 360 y 480 minutos, incluyendo la temperatura.

### **f.3. Corrección de las lecturas del hidrómetro**

La corrección de lecturas del hidrómetro La corrección del hidrómetro es un paso crítico para el análisis preciso de las propiedades del suelo. Esta fase también toma en cuenta las condiciones externas que pueden afectar la densidad calculada. La fórmula aplicada para esta corrección para lograr el valor final de la densidad corregida para todas las propiedades se da a continuación. (DC1).

$$DC1 = D1 + FC1 \quad (4)$$

#### **Donde:**

D1= La densidad que se tomo

FC1= Factor constante donde 0.5°C equivalen a 0.2g/L.

### f.3. Cálculos y expresión de resultados

Con la densidad corregida se hizo una determinación de la proporción de arena, arcilla y limo, que son valores básicos para las características granulométricas del suelo. Estas estimaciones permiten una declaración clara y más cuantitativa de los resultados. El porcentaje de cada fracción se calcula mediante las fórmulas a continuación:

$$(5) \quad \%Arena = 100 - \left( \frac{Pm}{Pm} * 100 \right) \quad DC1$$

$$(6) \quad \%Arcilla = \left( \frac{Pm}{Pm} * 100 \right) \quad DC2$$

$$(7) \quad \%Limo = 100 - \%arena - \%arcilla$$

$$(8) \quad \sum \%suelos = 100\%$$

### f.4. Rangos para la interpretación de datos para textura del suelo.

El diámetro de las partículas se lo interpreta con la siguiente tabla 12, donde se identifica los rangos máximos y mínimos:

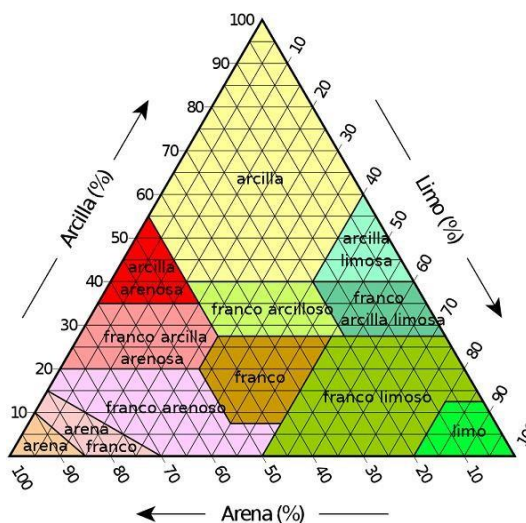
**Tabla 13.** *Diámetro de partículas*

<b>Nombre</b>	<b>Diámetro de las partículas (mm)</b>
Arcillas	< 0.002
Limo	0.002 – 0.005
Arena	0.005 – 2

Nota: Clasificación granulométrica del suelo según el diámetro de las partículas: arcilla (< 0.002 mm), limo (0.002–0.05 mm) y arena (0.05–2 mm). Fuente: (González & Coronado, 2007).

La clasificación del suelo según su composición granulométrica es un pilar fundamental en la edafología. Para facilitar esta clasificación y comprender las propiedades que de ella se derivan, se utiliza una herramienta gráfica ampliamente reconocida. A continuación, la Figura

7 ilustra este sistema de clasificación, permitiendo determinar la clase textural de un suelo a partir de los porcentajes de arena, limo y arcilla.



**Figura 6.** *Triángulo textural*

**Fuente:** (Moreno & Azcárate, 2022)

Es una herramienta gráfica útil que ayuda a clasificar el suelo en función de sus porcentajes de arena, limo y arcilla. Se asigna un eje a cada lado del triángulo con una escala del 0% al 100% para cada tipo de partícula. El lado izquierdo es el porcentaje de arcilla, con valores bajos en la mitad inferior que progresan a altos en la mitad superior. En el lado derecho, la proporción de limo (de arriba a abajo) en porcentaje aumenta simultáneamente. La base inferior está representada en porcentaje de arena y crece de derecha a izquierda.

Para caracterizar las clases texturales de una muestra de suelo, se trazaron las tres formas de porcentajes de arena, limo y arcilla en sus respectivos ejes, siguiendo a Moreno & Azcárate (2022). Paralelas a los otros dos lados, se dibujaron líneas desde cada uno de los puntos. La clase textural del suelo es la determinada por la ubicación de este punto de intersección.

#### **11.3.4. Metodología para el Análisis Estadístico de Datos**

##### **11.3.4.1. Método:**

Para el diseño de muestreo, se considerarán como variables de estudio:

- **Dependientes:** Parámetros físico – químicos del suelo.

- **Independientes:** Condición del suelo (afectado vs. no afectado) y profundidad (0 15cm vs. 15 – 30cm)

#### **11.3.4.2. Técnicas:**

##### **a) Análisis descriptivo:**

Mediante el cálculo de medidas de tendencia central como son la media y la desviación estándar, así como valores mínimo y máximo de cada parámetro que se analizó. Además, se elaborarán gráficos, como diagramas de caja, con el fin de visualizar las diferencias entre los suelos afectados y no afectados por el incendio.

##### **b) Validación de datos obtenidos**

Antes de aplicar un ANOVA de dos vías, es obligatorio validar dos supuestos estadísticos:

###### **b.1) Prueba de normalidad para cada grupo**

Se verifico el supuesto de la normalidad de los datos que se obtuvieron, para ello se utilizará la prueba de Shapiro – Wilk, para determinar que estas siguen una distribución normal. Según (Kassambara, 2020), las condiciones son:

- Si el valor de  $p \geq 0,05$ , se considera que los datos presentan una distribución normal y se procederá con la ANOVA de dos vías.
- Si el valor de  $p < 0,05$ , se opta por pruebas no paramétricas, como el test de Krustal – Wallis, para evaluar diferencias entre los grupos de estudio.

Además, si los datos no cumplen con el supuesto de normalidad verificado a través de la prueba de Shapiro-Wilk con un valor de  $p$  menor a 0,05, se aplicará una transformación de las unidades para los parámetros que no se cumplan. Se considera transformar a logaritmo natural (Ln). Esta transformación busca ajustar los datos a los criterios exigidos por cada prueba, garantizando que los resultados sean válidos y el análisis se realice bajo condiciones adecuadas ((Kassambara, 2020).

## **b.2) Homogeneidad de varianzas entre los grupos**

Para comprobar si las varianzas entre los grupos eran homogéneas, se utilizó una revisión visual de los boxplots contruidos a partir de los residuos estandarizados de cada variable. Esta herramienta permitió observar cómo se distribuían los residuos según la combinación de condición y profundidad del suelo. La similitud en el tamaño y forma de las cajas, junto con la estabilidad en los rangos intercuartílicos, sugirió que no había diferencias importantes en la dispersión. Estos patrones fueron tomados como evidencia suficiente para asumir que el supuesto de homogeneidad de varianzas se cumplía razonablemente, lo que da solidez a los resultados obtenidos mediante el análisis de varianza (Kassambara, 2020).

## **c) ANOVA de dos vías**

Una es la condición del suelo, diferenciado entre suelo afectado y no afectado por el fuego, y la otra es la profundidad del muestreo con los niveles 0-15 cm y 15-30 cm. Una vez realizado el análisis, será posible saber si existe un efecto significativo del fuego y de la profundidad sobre las propiedades del suelo, así como una posible interacción entre ambos factores.

Las hipótesis de la ANOVA de dos vías se plantean de la siguiente manera:

1. H<sub>1</sub>: H<sub>0(1)</sub> = No existen diferencias significativas entre suelo afectado y no afectado, y H<sub>1(1)</sub> = Sí existen diferencias significativas entre suelo afectado y no afectado.
2. H<sub>2</sub>: H<sub>0(2)</sub> = No existen diferencias significativas entre los niveles de profundidad (0–15 cm vs. 15–30 cm), y H<sub>1(2)</sub> = Sí existen diferencias significativas entre los niveles de profundidad.
3. H<sub>3</sub>: H<sub>0(3)</sub> = No hay interacción significativa entre condición del suelo y profundidad, y H<sub>1(3)</sub> = Sí existe interacción significativa entre condición del suelo y profundidad.

Para interpretar estos resultados se realizará en función del valor significativo p:

- Si  $p \leq 0,05$  para el efecto de la condición del suelo, se concluirá que los incendios han generado cambios significativos en las propiedades del suelo.
- Si  $p \leq 0,05$  para la profundidad, se concluirá que las características del suelo varían con la profundidad del muestreo.
- Si  $p \leq 0,05$  para ambos factores, se concluye que el efecto del incendio depende de la profundidad del suelo.

### 11.3.3. Herramientas:

**Tabla 14.** *Materiales y programas*

<b>Materiales</b>	<b>Software</b>
Computadora	Software Excel
	Software Infostat

Nota: Tabla de materiales y programas utilizados para los análisis estadísticos de los resultados obtenidos en el laboratorio. Fuente: Elaboración propia (2025).

## 11.4. Metodología para el Tercer Objetivo

Esta fase se desarrolló bajo un enfoque sostenible, formulando estrategias que fueron fundamentadas con la evidencia generada durante la etapa de análisis de los parámetros fisicoquímicos del suelo. Para ello, se consideraron los resultados obtenidos a partir del análisis estadístico paramétrico ANOVA, los cuales sirvieron como base para identificar las acciones de recuperación más adecuadas a las condiciones del sitio.

### 11.4.2. Método

En primer lugar, se aplicó un análisis de los resultados fisicoquímicos del suelo, con el fin de identificar los parámetros más afectados por los incendios y establecer prioridades de intervención según su impacto en la funcionalidad edáfica.

### 11.4.3. Técnicas

#### **- Revisión bibliográfica y documental:**

Se recopilaron y analizaron artículos científicos, guías técnicas (FAO, INIAP, MAATE) y estudios de casos relevantes sobre restauración de suelos afectados por incendios. De manera paralela, se realizó una revisión bibliográfica sobre experiencias exitosas de restauración ecológica en ecosistemas andinos afectados por incendios forestales, a fin de recolectar buenas prácticas adaptables al contexto del Cerro Putzalahua.

#### **- Análisis comparativo de datos edáficos:**

Se evaluaron las diferencias en pH, materia orgánica, fósforo, nitrógeno, textura y otras variables clave entre las muestras analizadas.

### 11.4.1. Herramientas:

#### - Software Excel:

Se organizaron y elaboraron tablas para relacionar las propiedades alteradas del suelo con posibles prácticas de restauración, resultados esperados y medios de verificación.

## 12. COMPROBACIÓN DE HIPÓTESIS

Antes de aplicar un ANOVA de dos vías, es obligatorio validar dos supuestos estadísticos:

### 12.1. Normalidad para Cada Grupo

Para comprobar si los datos de las propiedades físico-químicas del suelo seguían una distribución normal, se recurrió a la prueba de Shapiro-Wilk por grupo experimental (afectado y no afectado) y por profundidad (0–15 cm y 15–30 cm), utilizando un nivel de significancia del 5%. Dicho de otro modo, se buscó verificar si los valores cumplían con los supuestos ideales de normalidad estadística.

**Tabla 15.** Normalidad para cada grupo

Parámetro Químicos	Variabl e	Condición	Prof.	N	Medi a	D.E.	W*	p(Unilateral Normalida s e a D) d	Normalida d
	pH	Afectado	0-15	4	6.25	0.11	0.9	0.5645	Sí
	pH	Afectado	15-30	4	6.44	0.36	0.8	0.2549	Sí
	pH	No afectado	0-15	6	6.93	0.69	0.8	0.3802	Sí afectado 9
	pH	No afectado	15-30	6	6.97	0.71	0.8	0.1618	Sí afectado
	Ca	Afectado	0-15	4	240	38.8	0.9	0.8311	Sí
	Ca	Afectado	15-30	4	236.2	36.0	0.9	0.7896	Sí
	Ca	No afectado	0-15	6	140.8	43.6	0.9	0.8125	Sí afectado 3 4 6
	Ca	No afectado	15-30	6	132.5	37.7	0.9	0.9384	Sí afectado 30 4 8
	Na	Afectado	0-15	4	56.67	5.72	1	0.9923	Sí
	Na	Afectado	15-30	4	56.17	5.2	0.9	0.9611	Sí
	Na	No afectado	0-15	6	58.89	4.84	0.9	0.5094	Sí afectado 1
	Na	No afectado	15-30	6	58.94	4.58	0.9	0.5843	Sí
	K	Afectado	0-15	4	229.5	18.3	0.9	0.6198	Sí
	K	Afectado	15-30	4	227.0	20.0	0.9	0.9385	Sí
	K	No afectado	0-15	6	183.0	22.0	0.9	0.8194	Sí

	K	No afectado	15-30	6	176.67	19.26	0.9	0.4402	Sí
	MO	Afectado	0-15	4	1.21	0.14	0.98	0.8579	Sí
	MO	Afectado	15-30	4	2.09	0.99	0.88	0.3715	Sí
	MO	No afectado	0-15	6	1.6	0.51	0.88	0.3141	Sí
	MO	No afectado	15-30	6	1.44	0.69	0.7	0.0061	No
<b>Físicos</b>	% Arena	Afectado	0-15	4	49.21	1.81	0.87	0.334	Sí
	% Arena	Afectado	15-30	4	49.21	1.81	0.87	0.334	Sí
	% Arena	No afectado	0-15	6	50.67	2.15	0.79	0.0565	Sí
	% Arena	No afectado	15-30	6	50.67	2.15	0.79	0.0565	Sí
	% Arcilla	Afectado	0-15	4	39.6	0.9	0.87	0.3293	Sí
	% Arcilla	Afectado	15-30	4	39.6	0.9	0.87	0.3293	Sí
	% Arcilla	No afectado	0-15	6	38.87	1.08	0.79	0.0581	Sí
	% Arcilla	No afectado	15-30	6	38.87	1.08	0.79	0.0581	Sí
	% Limo	Afectado	0-15	4	11.2	0.9	0.87	0.3293	Sí
	% Limo	Afectado	15-30	4	11.2	0.9	0.87	0.3293	Sí
	% Limo	No afectado	0-15	6	10.47	1.08	0.79	0.0581	Sí
	% Limo	No afectado	15-30	6	10.47	1.08	0.79	0.0581	Sí
	CE	Afectado	0-15	4	0.19	0.05	0.85	0.2269	Sí
	CE	Afectado	15-30	4	0.19	0.07	0.96	0.7552	Sí
	CE	No afectado	0-15	6	0.21	0.05	0.85	0.1844	Sí
	CE	No afectado	15-30	6	0.24	0.08	0.77	0.0396	No

Nota: Representación de la normalidad por grupo. Fuente: Elaboración propia (2025)

**Interpretación:** Los resultados mostraron que la gran mayoría de las variables analizadas cumplen con el supuesto de normalidad ( $p > 0.05$ ), sus distribuciones son normales. De las variables químicas, el pH presentó distribución normal en todas las condiciones y profundidades. Fueron ligeramente ácidos en suelos afectados (media: 6.25–6.44) y aparentemente más neutros en los no afectados (media: 6.93–6.97), en consonancia con la acidificación moderada provocada por los incendios (Certini, 2019). En cuanto al calcio (Ca), la normalidad generalizada fue evidente. Los valores más altos se observaron en los suelos

afectados, particularmente en los horizontes superficiales, posiblemente debido a la liberación de cationes intercambiables después de la quema de biomasa.

Las concentraciones de sodio (Na) también siguieron una distribución normal en todos los grupos, con medias levemente más bajas en suelos afectados (56.67–56.17 ppm) respecto a los no afectados (58.89–58.94 ppm), aunque las diferencias no son marcadas. El potasio (K), nutriente clave en la fertilidad edáfica postincendio, mostró normalidad en todos los grupos, con un ligero descenso en las capas más profundas de los suelos no afectados (176.67 ppm). En cuanto a la materia orgánica (MO), todos los grupos cumplieron con el supuesto de normalidad, salvo el grupo no afectado (15–30 cm) que presentó un valor de  $p = 0.0061$ , indicando una distribución no normal. Esta anomalía podría deberse a la baja variabilidad de MO en zonas no perturbadas y a posibles valores extremos.

En las variables físicas, los porcentajes de arena y arcilla mostraron en su mayoría distribución normal. No obstante, en algunas profundidades específicas (por ejemplo, % arena en no afectados 15–30 cm), la normalidad fue marginal ( $p = 0.0565$ ). La proporción de limo se mantuvo distribuida normalmente tanto en suelos afectados como no afectados, lo que permitió un análisis adicional sin la necesidad de transformación adicional. La conductividad eléctrica (CE) se exhibió con normalidad en todos los grupos, excepto en el estrato no afectado (15–30 cm), con un valor  $p$  de 0.0396, lo que indica una distribución no normal de la CE para este estrato. Esto podría explicarse por una mayor variabilidad de la salinidad en el subsuelo, quizás como resultado del lixiviado.

En resumen, los resultados de la prueba de Shapiro-Wilk indicaron que la mayoría de las variables presentan una distribución adecuada para aplicar ANOVA. Sin embargo, la materia orgánica en suelos no afectados a 15–30 cm y conductividad eléctrica en la misma condición, no cumplen el criterio de normalidad.

### ***12.1.1. Transformación a Logaritmo Natural o Ln***

En esta fase del análisis, se procedió a realizar una transformación logarítmica natural (Ln) sobre los valores de conductividad eléctrica (CE) y materia orgánica (MO), exclusivamente en aquellos grupos donde la distribución inicial no cumplía con el supuesto de normalidad ( $p < 0.05$ ).

**Tabla 16.** Normalidad para cada grupo transformando a Ln

Variab le	Condicio n	Profundidad (cm)	Medi a	D.E .2	W*	p (Unilateral D)	Normalidad (p>0.05)
LN_CE	Afectado	0-15	-1.69	0.4	0.84	0.1979	Sí
LN_CE	Afectado	15-30	-1.7	0.36	0.98	0.8944	Sí
LN_CE	No afectado	0-15	-1.6	0.25	0.84	0.1714	Sí
LN_CE	No afectado	15-30	-1.45	0.29	0.84	0.1519	Sí
LN_M O	Afectado	0-15	0.19	0.11	0.99	0.9156	Sí
LN_M O	Afectado	15-30	0.66	0.45	0.92	0.5267	Sí
LN_M O	No afectado	0-15	0.42	0.34	0.87	0.2935	Sí
LN_M O	No afectado	15-30	0.29	0.38	0.79	0.0627	Sí

Nota: La tabla representa la normalidad para cada grupo transformando a Ln Fuente: Elaboración propia (2025)

**Interpretación:** La variable CE, específicamente en el grupo de suelo no afectado a 15–30 cm de profundidad, mostró inicialmente una distribución no normal ( $p = 0.0396$ ). Luego de aplicar la transformación logarítmica natural, los valores ajustados de Ln\_CE alcanzaron la normalidad en todos los grupos evaluados ( $p > 0.05$ ). El estadístico de Shapiro-Wilk para este grupo fue  $W = 0.84$  con un valor de  $p = 0.1519$ , lo que indica que, tras la transformación, los datos se ajustan adecuadamente a una distribución normal. De forma similar, la materia orgánica en suelos no afectados a 15–30 cm presentaba inicialmente una distribución no normal ( $p = 0.0061$ ). Tras la transformación logarítmica el valor de  $p$  aumentó a 0.0627, superando el umbral crítico de 0.05, por lo que se acepta la hipótesis de normalidad. Si bien el estadístico  $W^*$  fue relativamente bajo ( $W^* = 0.79$ ), el resultado es aceptable y consistente con los criterios establecidos en análisis edáficos (Pérez et al., 2021).

**Tabla 17.** Comprobación de la normalidad de las variables fisicoquímicas y transformaciones previas al ANOVA

Variable	Transformación	Normalidad (Shapiro-Wilk)	ANOVA
pH	No	Todos los grupos normales	Sí
CE	Sí (LN_CE)	Todos los grupos normales tras transformación	Sí
Ca	No	Todos los grupos normales	Sí
Na	No	Todos los grupos normales	Sí
K	No	Todos los grupos normales	Sí
MO	Sí (LN_MO)	Todos los grupos normales tras transformación	Sí
%Arena	No	Todos los grupos normales	Sí

%Arcilla	No	Todos los grupos normales	Sí
%Limo	No	Todos los grupos normales	Sí

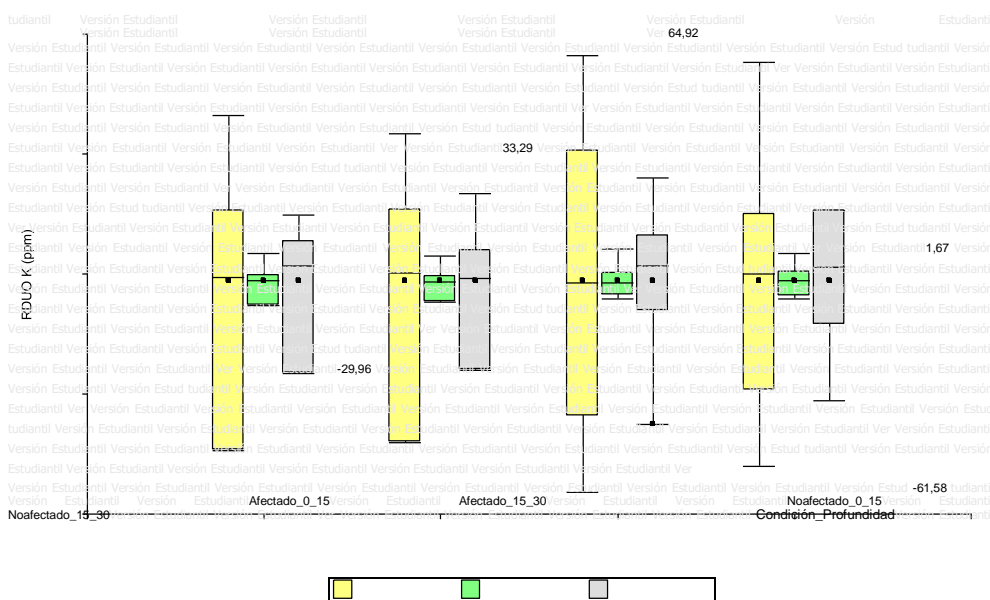
Nota: Valores de la comprobación de la normalidad de las variables fisicoquímicas. Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos del InfoStaf (2025).

**Interpretación:** Se consideró que la transformación logarítmica natural había tenido éxito en restaurar las desviaciones de la normalidad que se habían observado cuando se analizaron inicialmente la conductividad eléctrica y la materia orgánica. A partir de estos resultados, se asegura la validez estadística para proceder con el análisis de varianza (ANOVA), lo que refuerza la interpretación comparativa entre condiciones (afectadas/no afectadas) y profundidades (0–15 cm y 15–30 cm). Este procedimiento es coherente con la literatura metodológica en estudios de calidad de suelos postincendio, donde transformaciones logarítmicas son comunes debido a la alta variabilidad de ciertos parámetros como la CE y la MO (Certini, 2019; Mataix & Guerrero, 2020).

### 12.2. Homogeneidad de Varianzas entre los Grupos

Para cumplir los supuestos necesarios para aplicar el análisis de varianza (ANOVA), se evaluó la homogeneidad de varianzas entre los grupos experimentales mediante diagramas de caja construidos a partir de los residuos estandarizados (RUD0) de cada variable analizada. Este enfoque gráfico permite detectar de forma preliminar posibles discrepancias en la dispersión de los datos, especialmente en investigaciones con tamaños de muestra limitados. Tal como lo sugieren Field (2020) y Kassambara (2020), se observó cuidadosamente la forma de cada caja: su simetría, el tamaño del rango intercuartílico (IQR), la extensión de los bigotes e incluso si aparecían o no valores atípicos (que, a veces, pueden ser bastante reveladores).

#### a) Parámetros químicos



Versión Estudiantil Versión Estudiantil Versión Estudiantil Versión Estudiantil Versión Estudiantil Versión Estudiantil Versión Estudiantil Versión Estudiantil Versión Estudiantil Versión Estudiantil Versión Estudiantil Versión Estudiantil Ver

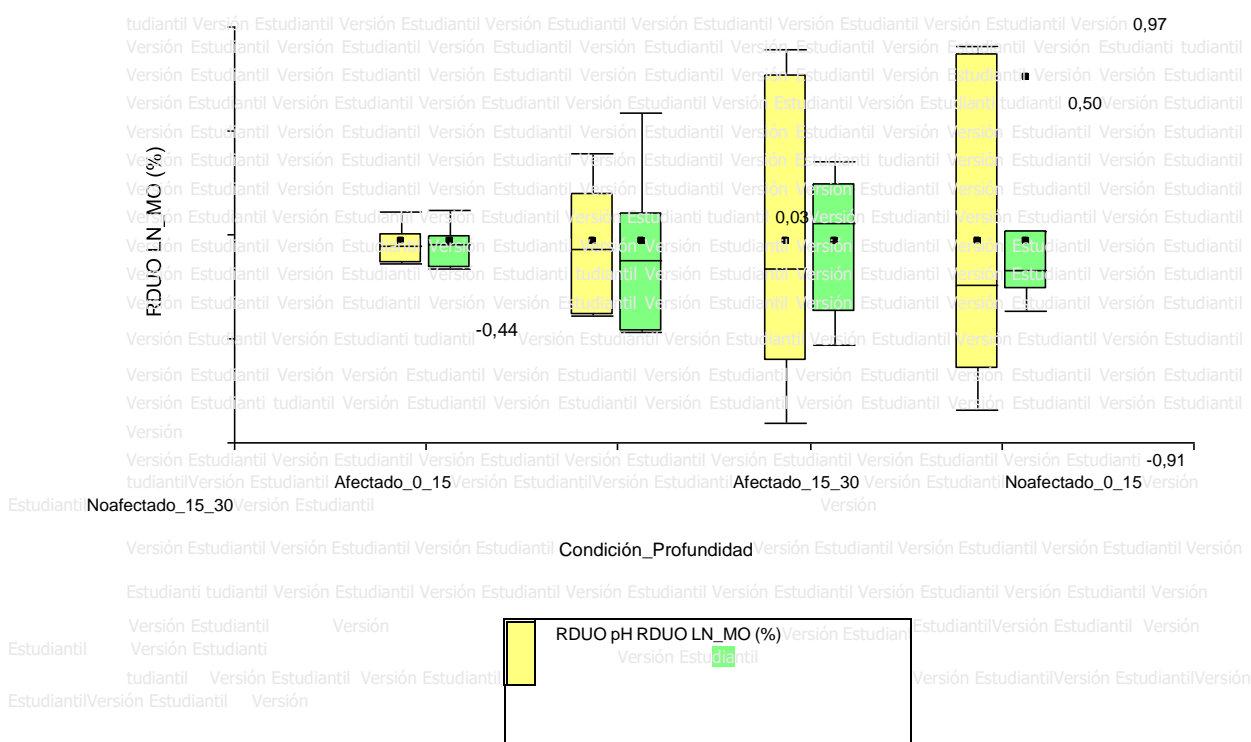
Versión Estudiantil Versión Estudiantil Versión Estudiantil Versión Estudiantil Versión Estudiantil Versión Estudiantil Versión Estudiantil Versión Estudiantil Versión Estudiantil Versión Estudiantil Versión Estudiantil Versión Estudiantil Ver

RDUO Ca (ppm) RDUO Na (ppm) RDUO K (ppm)

**Figura 7. Residuos estandarizados de Ca, Na y K**

**Elaborado por: Autores**

**Interpretación:** Los residuos estandarizados correspondientes a Ca, Na, K, pH, materia orgánica (Ln\_MO) y conductividad eléctrica (Ln\_CE) se presentan en las dos primeras gráficas. En general, la dispersión de los residuos se mantuvo dentro de los márgenes esperados (-2 a 2 desviaciones estándar), sin evidencia clara de varianzas muy dispares entre grupos. En el caso del Ca, las cajas presentan tamaños similares y sin presencia de valores atípicos, lo cual sugiere una varianza relativamente homogénea entre condiciones y profundidades. Para Na y K, se observó una ligera mayor dispersión en las muestras de suelos afectados (0–15 cm), sin embargo, esta variabilidad no parece comprometer la homogeneidad general, ya que los bigotes de las cajas permanecen dentro de límites aceptables.



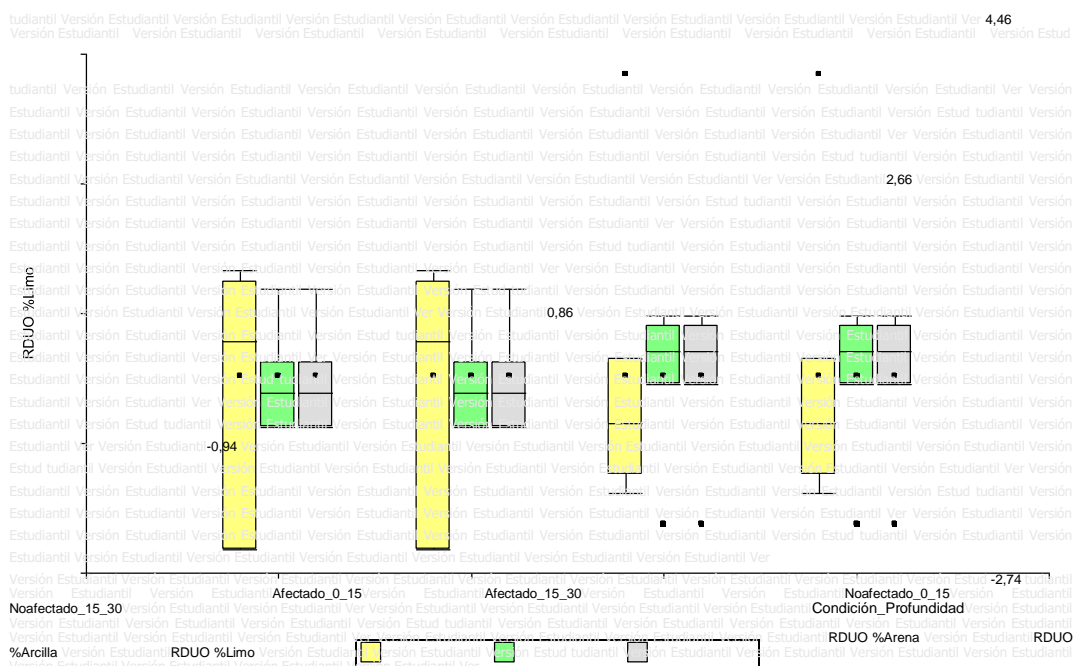
**Figura 8. Residuos estandarizados de Ln\_%MO y pH**

**Elaborado por: Autores**

**Interpretación:** En cuanto al pH los residuos muestran una distribución centrada y simétrica. La dispersión entre grupos es similar, especialmente en suelos no afectados, lo cual respalda la consistencia del modelo. Finalmente, para la materia orgánica (Ln\_MO) la

dispersión de los residuos no difiere drásticamente entre condiciones y profundidades. Aunque se registra una leve mayor amplitud en el grupo afectado a 15–30 cm, esta diferencia no parece suficiente para comprometer el supuesto de homogeneidad de varianzas (Field, 2020; Kassambara, 2020).

**b) Parámetros físicos**

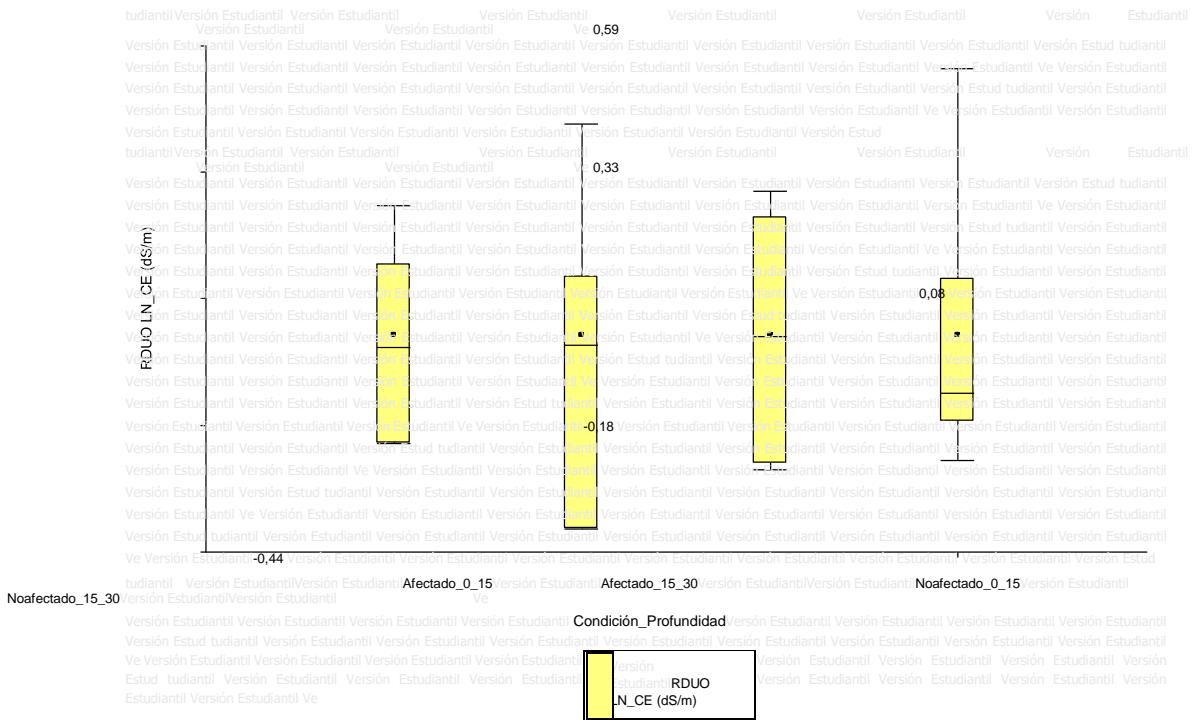


**Figura 9. Residuos estandarizados de textura**

**Elaborado por: Autores**

**Interpretación:** El porcentaje de arena, % de arcilla y % de limo en el gráfico de residuos acepta de manera similar el patrón de distribución normal. Para la arena, los residuos están entre -0.3 y 0.3 con el mismo nivel de magnitud para diferentes condiciones. Uno o dos valores atípicos sospechosos entre las muestras afectadas no fallarían gravemente en la suposición.

Para arcilla, la variabilidad fue moderada y simétrica, sin valores atípicos notorios. Las cajas y bigotes se mantuvieron en proporciones similares entre las cuatro combinaciones de profundidad y condición, lo cual indica una varianza homogénea. El limo mostró una dispersión ligeramente mayor en el grupo afectado 0–15 cm, pero sin traspasar los límites críticos de 2 desviaciones estándar, ni producir asimetrías marcadas.



**Figura 10. Residuos estandarizados de Ln<sub>CE</sub>**

**Elaborado por: Autores**

En el grupo No afectado 0–15 cm, los residuos presentan una leve mayor dispersión vertical en comparación con los demás grupos. El rango intercuartílico es más amplio y los bigotes también se extienden más. Esta mayor amplitud sugiere que la varianza de los residuos en este grupo podría ser ligeramente superior, aunque no hay valores atípicos extremos ni asimetrías preocupantes.

En contraste, los grupos afectados (0–15 y 15–30 cm) muestran residuos más concentrados, con cajas de tamaño más compacto, lo cual refuerza la idea de menor variabilidad interna. Aunque se detecta una ligera mayor dispersión de los residuos en suelos no afectados (0–15 cm), el comportamiento general de los residuos estandarizados para Ln<sub>CE</sub> es aceptable. El gráfico no muestra indicios claros de varianzas heterogéneas entre grupos, por lo que se considera que la variable transformada cumple con el supuesto de homogeneidad de varianzas (Field, 2020; Kassambara, 2020). A partir de los diagramas de caja construidos con los residuos

estandarizados, se concluye que no existen diferencias sustanciales en las varianzas entre grupos experimentales, tanto en parámetros químicos como físicos. La dispersión de los residuos es equilibrada y no se detectan valores extremos ni estructuras sesgadas.

**Tabla 18.** *Comprobación de homogeneidad y procedimiento estadístico aplicado a las variables fisicoquímicas previas al ANOVA*

Variable	Homogeneidad	Procedimiento
LN_pH	Sí	ANOVA
LN_CE	Sí, límite	ANOVA
Ca	Sí	ANOVA
Na	Sí	ANOVA
K	Sí	ANOVA
LN_MO	Sí, límite	ANOVA
% Arena	Sí	ANOVA
% Arcilla	Sí	ANOVA
% Limo	Sí	ANOVA

Nota: Datos de la comprobación de la homogeneidad y procesos estadísticos aplicados a las variables fisicoquímicas. Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos del InfoStaf(2025).

Este enfoque, aunque exploratorio, es ampliamente reconocido como herramienta preliminar válida cuando se trabaja con tamaños de muestra moderados y pretende reforzar la robustez de los análisis estadísticos subsiguientes (Gómez et al., 2019). Por lo tanto, se justifica estadísticamente la aplicación del ANOVA en las siguientes etapas del análisis.

### 12.3. ANOVA de dos vías

Se aplicó ANOVA como prueba paramétrica, esta prueba fue seleccionada debido al cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas para todos los parámetros fisicoquímicos, dando como resultado:

#### a) *Para la variable condición:*

Se rechaza  $H_{0(1)}$  si  $p < 0.05$  para condición, de lo contrario se acepta la  $H_{11}$ .

**Tabla 19.** *ANOVA para la variable condición*

Parámetros	Variable	CV	F	p-valor	Significancia
------------	----------	----	---	---------	---------------

<b>Químicos</b>	pH Ca	8.21	5.84	0.0265	Si
	Na	21.15	35.15	<0.0001	Si
		8.15	1.34	0.2613	No
	K	9.64	30.59	<0.0001	Si
	LN_MO	96.35	0.17	0.6881	No
<b>Físicos</b>	% Arena	3.81	2.78	0.1127	No
	% Arcilla	2.44	2.78	0.113	No
	% Limo	8.88		0.113	No
	LN_CE	17.37	1.82	0.1937	No

Nota: La tabla representa el ANOVA para la variable condición. Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos del InfoStaf (2025).

**Interpretación:** El análisis de varianza de un factor (condición: afectado vs. no afectado) para algunos parámetros fisicoquímicos del suelo presentó que algunos factores fisicoquímicos del suelo fueron significativamente diferentes después del incendio, y otros no cambiaron. El comportamiento de cada factor es el siguiente: El suelo en áreas quemadas tuvo un pH significativamente reducido como una medida de la acidificación posincendio. Esta reducción se debe a un aumento en la descomposición térmica de la materia orgánica y la generación de productos ácidos de la combustión parcial. Encuestas recientes muestran que las cenizas pueden elevar temporalmente el pH del suelo, aunque tiende a disminuir a medio plazo como resultado del lixiviado de bases y la liberación de cargas ácidas del suelo (Lombao et al., 2023; Ruiz et al., 2021).

El contenido de calcio fue significativamente mayor en suelos afectados. Este incremento es consistente con procesos de liberación de cationes desde la biomasa vegetal y las capas superficiales minerales, que, al ser expuestas al fuego, transforman nutrientes ligados en formas disponibles (García et al., 2022). La ceniza, rica en  $\text{Ca}^{2+}$ , actúa como una fuente temporal de nutrientes básicos. El potasio también mostró diferencias significativas entre suelos afectados y no afectados. Se trata de un nutriente altamente móvil, cuya disponibilidad aumenta rápidamente después de incendios debido a la solubilización de compuestos orgánicos y minerales potásicos (A. Rodríguez et al., 2020). Su elevación puede contribuir a un pulso fertilizante a corto plazo.

No se observaron diferencias sustanciales en Na. El sodio, un elemento menos asociado con las reacciones de combustión y no fácilmente retenido en el complejo de intercambio, presenta un comportamiento más estable en presencia de incendios de intensidad moderada

(Silva & Pinto, 2022). No se detectaron cambios significativos en las fracciones de humus. Si bien el fuego normalmente disminuye la materia orgánica superficial, el impacto observado puede estar influenciado por la intensidad del fuego y el tipo de vegetación. Existe la posibilidad de que la quema no haya tenido tal importancia como para producir pérdidas medibles, o existan procesos de reintegración orgánica post-quema (Jiménez et al., 2021).

No hubo diferencias significativas en la fracción granulométrica del suelo. Este resultado era esperado, dado que la textura es una propiedad edáfica heredada del material parental y no suele alterarse por incendios, salvo en casos extremos con fusión o sellado superficial (Certini, 2019).

No se observaron cambios estadísticamente significativos en la CE. Aunque la ceniza puede aumentar temporalmente la salinidad del suelo, su efecto es transitorio y depende de factores como las lluvias post-incendio, la infiltración y el tipo de cobertura vegetal (Vásquez, 2022). Sin embargo, por el tiempo en que ya ha ocurrido el incendio, la ausencia de diferencias estadísticas en variables como MO y CE no implica necesariamente que el fuego no haya generado un impacto inicial, sino que es probable que los procesos de regeneración natural y climática hayan atenuado los efectos visibles, como se ha observado en otros ecosistemas volcánicos o de alta montaña (Lombao et al., 2023; Pereira et al., 2023).

**b) Para la variable profundidad:**

Se rechaza  $H_{0(2)}$  si  $p < 0.05$  para profundidad, caso contrario se acepta  $H_{12}$ .

**Tabla 20.** ANOVA para la variable profundidad

<b>Parámetros</b>	<b>Variable</b>	<b>CV</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>	<b>Significancia</b>
<b>Químicos</b>	pH	9.41 36.3	0.12 0.05	0.7281	No
	Ca	8.45	0.01	0.8238	No
	Na			0.9402	No
	K	15.78	0.12	0.735	No
	LN_MO	95.61	0.45	0.51	No
<b>Físicos</b>	% Arena	4.1	0	1	No
	% Arcilla	2.62	0	1	No
	% Limo	9.54	0	1	No
	LN_CE	18.01	0.43	0.5204	No

Nota: La tabla representa el ANOVA para la variable profundidad. Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos del InfoStaf(2025).

**Interpretación:** Los resultados de esta comparación indican que ninguna de las variables analizadas varió significativamente con la profundidad (todos los p-valores > 0.05). Es decir, se acepta la hipótesis nula  $H_{0(2)}$ . Este resultado sugiere que el impacto del incendio no se trasladó de forma diferenciada hacia capas subsuperficiales, o que las propiedades edáficas tienden a mantenerse estables en los primeros 30 cm, como es típico en suelos volcánicos con alta porosidad y capacidad de amortiguación térmica (Certini, 2019). Además, dado el tiempo transcurrido desde el evento, es razonable suponer que los procesos de infiltración y mezcla vertical contribuyeron a homogeneizar ciertas propiedades entre ambas capas (Pereira et al., 2023; A. Rodríguez et al., 2020).

*c) Condición y profundidad:*

**Tabla 21.** ANOVA de la interacción condición y profundidad

Parámetros	Variable	CV	F	p-valor	Significancia			
Químicos	pH	8.64	1.83	0.1822	No			
	Ca (ppm)	22.33	10.56	0.0004	Si			
	Na (ppm)	8.64	0.41	0.7509	No			
	K (ppm)	10.12	9.36	0.0008	Si			
	LN_MO	91.38	1.4	0.2793	No			
	% Arena	4.05	2.59	0.82	0.82	0.4997	0.5005	No
	% Arcilla	9.42	0.82	0.5005			No	
Físicos	% Limo						No (dS/m)	
	LN_CE	17.96	0.85	0.4866			No	

Nota: Tabla presenta el ANOVA de la interacción de las condiciones tanto de profundidad como de condición. Fuente:

Elaboración propia, datos obtenidos del InfoStaf (2025).

**Interpretación:** En el análisis de interacción (condición × profundidad), solo Ca y K presentaron interacción significativa. Se evidenció una interacción estadísticamente significativa entre la condición del suelo y la profundidad. Esto sugiere que el incremento de calcio en suelos afectados no fue homogéneo en ambos estratos: probablemente fue mayor en la capa superficial (0–15 cm) debido a la acumulación de cenizas, y menor en profundidad. Este comportamiento es coherente con investigaciones que muestran una mayor concentración de cationes base en la superficie post-fuego, con disminución progresiva hacia el subsuelo (Pereira et al., 2023; Rodríguez et al., 2020).

También se dice que el potasio se ve afectado en diferente medida por el fuego dependiendo de la profundidad. Dado que el potasio es muy soluble, es probable que se concentre en la superficie inmediatamente después de un incendio, aunque se lixiviará si no es retenido por la vegetación. Este hecho puede explicar la fuerte divergencia entre capas y su reactividad hacia la interacción (Silva & Pinto, 2022).

Para el resto de las variables, la interacción no tuvo significancia estadística ( $p > 0.05$ ), indicando que su patrón en respuesta al fuego fue el mismo en ambas profundidades. Dicho de otro modo, el incendio tuvo (o no tuvo) un efecto, pero ese efecto no dependió de si el suelo estaba a 0–15 cm o 15–30 cm. Esto puede explicarse por la capacidad amortiguadora del suelo volcánico del Putzalahua, que limita la penetración térmica y mantiene condiciones relativamente estables en profundidad (Lombao et al., 2023).

Finalmente, se rechaza parcialmente la hipótesis nula H3, ya que hubo interacción significativa entre la condición del suelo y la profundidad para los nutrientes Ca y K, pero no para el resto de variables.

**Tabla 22.** Resultados de hipótesis

<b>Hipótesis</b>	<b>Resultado</b>	<b>Conclusión</b>
H <sub>1(1)</sub>	Parcialmente aceptada	La condición del suelo sí afecta algunas variables fisicoquímicas (pH, Ca y K), lo que rechaza parcialmente la hipótesis nula H <sub>0(1)</sub> : <i>No existen diferencias significativas entre suelo afectado y no afectado.</i>
H <sub>0(2)</sub>	Aceptada	No se encontraron diferencias significativas entre profundidades, por lo tanto, se descarta la hipótesis H <sub>1(2)</sub> : <i>la profundidad influye en las propiedades del suelo.</i>
H <sub>1(3)</sub>	Parcialmente aceptada	Se observó interacción significativa entre condición y profundidad solo en Ca y K, respaldando parcialmente H <sub>0(3)</sub> : <i>No hay interacción significativa entre condición del suelo y profundidad.</i>

Nota: La siguiente tabla presenta los resultados de las hipótesis analizadas. Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos del InfoStaf (2025).

Después del tiempo transcurrido desde el incendio forestal, el análisis estadístico aún indica que la variable de si la condición del suelo fue influenciada por el fuego influye significativamente en algunas propiedades fisicoquímicas, principalmente el pH, el calcio (Ca) y el potasio (K). Este aspecto implicó un rechazo parcial de la hipótesis H<sub>01</sub> y muestra que, con el tiempo, el fuego determinó una alteración en la composición química del suelo (Marfella et al., 2024). Sin embargo, otras variables, incluyendo CE, Na, MO y textura (%arena, %arcilla,

%limo) no mostraron diferencias estadísticamente significativas, lo que podría interpretarse desde el punto de vista de una mayor estabilidad o un proceso de desintoxicación por parte de las plantas en estos rasgos (Cheng, 2021; Frontiers Editorial Office, 2023). Respecto a la hipótesis  $H_{0(2)}$ , fue aceptada; es decir, no hubo diferencias significativas entre las profundidades muestreadas. Esto significa que la profundidad del suelo no influyó mucho en los datos calculados (Rustowska, 2022).

Por último, la hipótesis  $H_{0(3)}$  fue parcialmente rechazada, ya que se observaron diferencias significativas entre condiciones y profundidad solo para Ca y K, demostrando que el efecto del fuego en estos nutrientes cambia según la profundidad del suelo. En conjunto, estos resultados refuerzan que el tiempo y la profundidad del perfil del suelo deben considerarse al determinar la recuperación del suelo después de tal evento (Rustowska, 2022; Smith et al., 2024).

Esta prueba de hipótesis nos permitió determinar si los resultados logrados abordaron las propuestas planteadas en el estudio original. La hipótesis nula  $H_{0(1)}$  fue parcialmente rechazada, ya que surgieron diferencias significativas entre pH, calcio (Ca) y potasio (K) después del fuego, y variaciones débiles de nitrógeno (N) y fósforo (P), que mostraron un 11.62% y un 10.39% de variación, respectivamente. Esto es otra evidencia a favor de la hipótesis alternativa  $H_{11}$ . Con respecto a la hipótesis  $H_{0(2)}$ , se prueba, ya que no existen diferencias significativas entre las dos capas estudiadas, lo que indica que el fuego no produjo un impacto diferencial en los estratos del suelo, descartando así  $H_{1(2)}$ .

Finalmente,  $H_{0(3)}$  también fue parcialmente rechazada, ya que se encontró una interacción significativa entre la condición del suelo y la profundidad, pero nuevamente solo fue significativa en Ca y K, indicando que estos elementos se mezclan dentro del suelo debido al fuego. En conjunto, estos hallazgos confirman parcialmente los supuestos del estudio y sugieren que el impacto del incendio sobre el suelo es selectivo, afectando de forma diferenciada ciertos parámetros fisicoquímicos, mientras que otros permanecen más estables frente a este tipo de disturbio.

## 13. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 13.1. Resultados del Análisis Estadístico de Datos Obtenidos en Laboratorio.

#### a) Resultados del análisis de pH

Los valores de pH en los puntos muestreados de la zona afectada y no afectada se reportaron en la Tabla 22. Este parámetro, fundamental para evaluar la acidez o alcalinidad del suelo, permitió reconocer una tendencia hacia valores ligeramente ácidos con algunos puntos hasta condiciones neutras. **Tabla 23. Resultados pH**

<b>Punto</b>	<b>pH</b>	<b>Evaluación del pH</b>
<b>Afectado</b>		
1	6.28	Ligeramente ácido
2	6.10	Ligeramente ácido
3	6.18	Ligeramente ácido
4	6.16	Ligeramente ácido
5	6.38	Ligeramente ácido
6	6.65	Neutro
7	6.15	Ligeramente ácido
8	6.84	Neutro
<b>No afectado</b>		
9	7.68	Medianamente básico
10	7.85	Medianamente básico
11	7.04	Neutro
<b>Punto</b>	<b>pH</b>	<b>Evaluación del pH</b>
12	6.95	Neutro
13	7.79	Medianamente básico
14	7.82	Medianamente básico
15	6.11	Ligeramente ácido
16	6.21	Ligeramente ácido
17	6.39	Ligeramente ácido
18	6.60	Neutro
19	6.57	Ligeramente ácido
20	6.40	Ligeramente ácido

Nota: La siguiente tabla representa los valores obtenidos del pH en zonas afectadas y no afectadas Cerro Putzalahua. Fuente: Elaboración propia con datos analizados en el Laboratorio Universidad Técnica de Cotopaxi (2025).

Los valores registrados de pH en los sitios afectados por el fuego estaban entre 6.10 y 6.84, principalmente "ligeramente ácidos" y menos "neutros". Esta acidez está asociada a la disminución de cationes básicos y la acumulación de productos ácidos resultantes de la combustión de materiales orgánicos, lo que lleva a una reducción en la capacidad de

amortiguación del suelo y a un efecto negativo en la actividad microbiana y el suministro de nutrientes.

Estas cifras fueron de 6.11 a 7.85 en suelos cercanos no perturbados que muestran condiciones "neutras" y "moderadamente básicas", más indicativas de una estabilidad química mejorada y menos cambios estructurales. De este modo un aspecto importante a tener en cuenta es que en cinco de los puntos no afectados se obtuvieron valores superiores a 7.6; lo que los situaría dentro de los suelos "alcalinos" según el Anexo 2 del Acuerdo Ministerial 097A (MAATE, 2015). Esta condición es favorable para la presencia de algunos nutrientes (por ejemplo, Ca y Mg), pero puede inhibir la (re)asimilación del fósforo al formar compuestos insolubles.

Por un lado, confirman el alcance del mantenimiento de la acidez diferencial en suelos quemados cinco años después del incendio, y los programas de restauración y fertilización deben estar condicionados por la dinámica química específica de cada sitio.

#### b) Resultados conductividad eléctrica

En la tabla 23 se presentan los resultados de la conductividad eléctrica (CE) del suelo en áreas afectadas y no afectadas por incendios. Este parámetro es un excelente indicador de la cantidad de sal soluble que tiene el suelo. Por lo tanto, los valores registrados (en dS/m) se interpretaron de acuerdo con los límites de clasificación definidos en normas técnicas para la clasificación de la salinidad del suelo.

**Tabla 24.** Resultados CE

Punto	CE (dS/m)	Calificación del suelo según la Categoría
<b>Afectado</b>		
1	0.14	No salino
2	0.28	No salino
3	0.21	No salino
4	0.20	No salino
5	0.15	No salino
6	0.12	No salino
7	0.24	No salino
8	0.16	No salino
<b>No afectado</b>		
9	0.26	No salino
10	0.40	No salino
11	0.23	No salino

12	0.19	No salino
13	0.27	No salino
14	0.26	No salino
15	0.15	No salino
16	0.22	No salino
17	0.15	No salino
18	0.20	No salino
19	0.18	No salino
20	0.18	No salino

Nota: Resultados de conductividad eléctrica (CE) de las muestras afectados y no afectados. Fuente: Elaboración propia con datos analizados en el Laboratorio Universidad Técnica de Cotopaxi (2025).

Basado en los resultados sobre la CE, se observa que todos los suelos evaluados, después de los incendios, en áreas afectadas por el fuego y no quemadas, tienen valores "no salinos" (<2 dS/m). Variaron en el rango de 0.12 a 0.40 dS/m, y fueron inferiores a los límites impuestos por las normas técnicas para suelos agrícolas. Esto significa que la influencia térmica del fuego no fue suficiente para producir un aumento generalizado de sales solubles.

Esta falta de diferencias notables entre suelos quemados y no quemados indica que la CE no fue una propiedad muy afectada por la influencia del fuego en este ecosistema. Esta tendencia está en concordancia, con lo que ya se ha publicado en otros artículos: los cambios en la salinidad del suelo son transitorios o bajos durante el período posterior al incendio, particularmente en el caso de suelos volcánicos, con alto potencial de drenaje y capacidad de lixiviación después del incendio.

Por lo tanto, basándose en las concentraciones locales de CE y los aspectos hidrológicos de esta zona, no existe un riesgo a corto plazo de salinización que pueda comprometer la restauración ecológica del cerro Putzalahua. No se consideran necesarias medidas de mitigación de la salinidad del suelo en las primeras etapas de recuperación post-incendio.

#### **d) Resultados Nutrientes (Ca, K, Na)**

La Tabla 24 muestra las mediciones en los puntos muestreados de los campos afectados y no afectados de calcio, potasio y sodio. Considerados como indicadores de fertilidad del suelo, estos nutrientes indicaron posibles cambios en sus suministros después del incendio y la ocurrencia de procesos como la lixiviación o alteraciones en la dinámica de cationes.

**Tabla 25.** *Resultados Nutrientes (Ca, K, Na)*

<b>Punto</b>	<b>Ca (ppm)</b>	<b>K (ppm)</b>	<b>Na (ppm)</b>	<b><u>Interpretación de resultados</u></b>
<b>Afectado</b>				
1	283.33	226.67	55.00	Ca y K altos. Na medio
2	275.00	220.00	54.33	Ca y K altos. Na medio
3	258.33	240.00	58.00	Ca y K altos. Na medio
4	255.00	235.00	57.33	Ca y K altos. Na medio
5	223.33	246.67	63.67	Ca y K altos. Na alto
6	221.67	250.00	62.67	Ca y K altos. Na alto
7	195.00	205.00	50.00	Ca y K altos. Na medio
8	193.33	203.33	50.33	Ca y K altos. Na medio
<b>No Afectado</b>				
9	175.00	190.00	54.00	Ca y K altos. Na medio
10	150.00	183.33	54.67	Ca y K altos. Na medio
11	155.00	175.00	56.33	Ca y K altos. Na medio
12	145.00	165.00	57.00	Ca medio. K medio. Na medio
13	125.00	195.00	61.00	Ca medio. K alto. Na medio
14	123.33	195.00	61.33	Ca medio. K alto. Na medio
15	105.00	145.00	55.00	Ca medio. K medio. Na medio
16	103.33	145.00	54.00	Ca medio. K medio. Na medio
17	85.00	210.00	67.00	Ca medio. K alto. Na alto
18	83.33	195.00	66.00	Ca medio. K alto. Na alto
19	200.00	183.33	60.00	Ca medio. K alto. Na medio
20	190.00	176.67	60.67	Ca alto. K medio. Na medio

Nota: Resultados de los nutrientes más relevantes (Ca, K, Na). Fuente: Elaboración propia datos obtenidos en el Laboratorio Universidad Técnica de Cotopaxi (2025).

Según los resultados analíticos, el análisis químico se registra que solo los contenidos de calcio y potasio son significativamente más altos en lugares que han experimentado incendios. Aunque la interpretación inicial puede asociarse con una fertilidad adecuada a la fertilidad después del estrés térmico, una evaluación más detallada revela algunos riesgos subyacentes: un excedente constante de calcio podría, por ejemplo, cambiar la estabilidad a largo plazo de la estructura del suelo, impedir la formación y estabilización de agregados del suelo a mediano plazo y, por lo tanto, limitar el movimiento de materia y portadores de energía en el perfil del suelo.

Un aspecto negativo aparente se observó en los niveles de sodio registrados en 5 y 6, concentraciones de medias a altas. Su acumulación promueve el inicio de procesos de salinización, lo que podría inhibir la infiltración de agua y el desarrollo de raíces, y reducir la capacidad del suelo para sostener plantas durante el proceso de restauración.

Los suelos no afectados, en cambio, fueron más variables en cuanto a la concentración de calcio y potasio, mostrando valores alrededor de medios y altos. Esta variación indica un sistema químicamente más equilibrado, es decir, un funcionamiento más o menos estable de los ciclos biogeoquímicos. No obstante, deben tenerse en cuenta los riesgos locales, ya que a veces hay sodio alto sitios 17 y 18 presente. Pueden deberse a fenómenos naturales, como la evaporación superficial, o a la naturaleza del material parental del que se genera el suelo; este último contribuyendo aún más a la necesidad de vigilancia específica del sitio contra el inicio de la salinización del suelo.

Con referencia en ambos escenarios, está claro que el sodio es el elemento de mayor riesgo en términos de estado del suelo. Cuando se acumula en exceso, no solo destruye la estructura del suelo, llevando a la dispersión de arcilla, sino que también bloquea la absorción de nutrientes importantes y el equilibrio fisiológico de las plantas. Además, el desequilibrio iónico formado bajo condiciones acompañadas de alto Ca-K y Na impactaría directamente en el crecimiento y establecimiento de las plantas nativas. De ahí la necesidad de un control periódico del Na del suelo y, cuando sea necesario, de prácticas correctivas, como lavados periódicos o enmiendas con yeso agrícola, para evitar la degradación irreversible de este suelo.

#### e) Resultados Nutrientes 2 (N y P)

Los contenidos de nitrógeno (N) y fósforo (P) en ambos sitios de estudio se enumeran en la Tabla 25. Los macronutrientes son clave para la fertilidad del suelo y fueron un poco menores en el sitio perturbado, lo que sugiere un posible aumento de la mineralización o pérdida de materia orgánica derivada del incendio. **Tabla 26. Resultados Nutrientes N y P**

ZONA	N (ppm)	P (ppm)
Afectada	65.67	7.35
No Afectada	74.30	8.22

Nota: Resultados de los análisis de nitrógeno total (N) y fósforo disponible (P) en zonas afectadas y no afectadas, obtenidos del Laboratorio del INIAP-Quito. Fuente: Elaboración propia (2025).

A partir de los datos mostrados en la tabla, está claro que los contenidos de N y P fueron ligeramente más altos en suelos no quemados (74.30 ppm y 8.22 ppm) que en suelos quemados (65.67 ppm y 7.35 ppm).

Esta distinción lleva a la hipótesis de que, a pesar de las cenizas que contribuyeron a estos nutrientes después del incendio, la dinámica de N y P puede verse afectada negativamente a mediano plazo debido a procesos como la volatilización de N durante la combustión y la eventual lixiviación de P en ausencia de cobertura vegetal. Estos hallazgos resaltan la importancia de prácticas sostenibles que puedan ayudar a restaurar la fertilidad en suelos afectados.

#### f) Resultados Materia Orgánica

La tabla 26 resumió los valores de materia orgánica (MO) en varias ubicaciones del sitio afectado. Este es un componente importante en el ensamblaje y fertilidad del suelo, así como en el ciclo de nutrientes

**Tabla 27.** Resultados MO

<b>Punto</b>	<b>MO (%)</b>	<b>Interpretación mediante categorías</b>
<b>Afectado</b>		
1	1.24	Medio
2	3.46	Medio
3	1.39	Medio
4	2.20	Medio
5	1.07	Medio
6	1.43	Medio
7	1.16	Medio
8	1.28	Medio
<b>No afectado</b>		
9	1.94	Medio
10	4.04	Alto
11	2.18	Medio
12	1.40	Medio
13	0.96	Bajo
14	1.08	Medio
15	1.98	Medio
16	1.11	Medio
<b>Punto</b>	<b>MO (%)</b>	<b>Interpretación mediante categorías</b>
17	1.11	Medio
18	0.98	Bajo
19	1.41	Medio
20	1.25	Medio

Nota: Los resultados del contenido de materia orgánica (MO) Elaborado por: Autores; Obtenido de: Laboratorio Universidad Técnica de Cotopaxi.

Se observó en los resultados que la mayoría de los suelos afectados por el fuego presentan materia orgánica (MO) media, con valores entre 1,07 % y 3,46 %. Esta situación indica que, a pesar del impacto térmico, los periodos del suelo retienen una reserva orgánica moderada, lo que podría estar relacionado con el depósito de restos vegetales no quemados por el fuego y las etapas iniciales de la regeneración de la cubierta. Por lo tanto, la descomposición de la materia orgánica superficial debido a la combustión no fue completa, y esto es un beneficio relativo con respecto al restablecimiento de la estructura del suelo y la actividad microbiana.

Sin embargo, los suelos no tratados tienen una mayor variabilidad de MO. Se encontraron valores bajos (0,96 % y 0,98 %) y altos (4,04 %), pero predominan los valores medios. Tal degradación incompleta probablemente resultó del manejo agrícola pasado, en particular la práctica de la agricultura arable y la erosión superficial que conduce a un ataque orgánico localizado.

En conclusión, los resultados presentes destacaron que una gestión sostenible con enfoque en la restauración de la materia orgánica, esencial para la estabilidad estructural, la fertilidad intrínseca y la retención de agua del suelo, es crucial.

### g) Resultados textura

El análisis textural del suelo (basado en su proporción relativa de arena, arcilla y limo) desde 0 a 15 cm y de 15 a 30 cm de profundidad se muestra en la Tabla 27. Esta descripción permitió categorizar la textura y comprender la distribución de partículas, un paso significativo en la interpretación de la retención de agua, la aireación y el comportamiento físico del suelo.

**Tabla 28. Resultados Textura**

<b>Muestra</b>	<b>%Arena</b>	<b>%Arcilla</b>	<b>%Limo</b>	<b>Interpretación de resultados</b>
<b>Afectado</b>				
1A1	46.8	40.8	12.4	Franco arcilloso
<b>Muestra</b>	<b>%Arena</b>	<b>%Arcilla</b>	<b>%Limo</b>	<b>Interpretación de resultados</b>
1A2	46.8	40.8	12.4	Franco arcilloso
2A1	48.86	39.77	11.37	Franco arcilloso
2A2	48.86	39.77	11.37	Franco arcilloso
3A1	50.67	38.87	10.47	Franco arcilloso
3A2	50.67	38.87	10.47	Franco arcilloso

4A1	50.52	38.94	10.54	Franco arcilloso
4A2	50.52	38.94	10.54	Franco arcilloso
<b>No afectada</b>				
1NA1	50.9	38.75	10.35	Franco arcilloso
1NA2	50.9	38.75	10.35	Franco arcilloso
2NA1	54.8	36.8	8.4	Franco arenoso
2NA2	54.8	36.8	8.4	Franco arenoso
3NA1	50.46	38.97	10.57	Franco arcilloso
3NA2	50.46	38.97	10.57	Franco arcilloso
4NA1	49.03	39.69	11.29	Franco arcilloso
4NA2	49.03	39.69	11.29	Franco arcilloso
5NA1	49.28	39.56	11.16	Franco arcilloso
5NA2	49.28	39.56	11.16	Franco arcilloso
6NA1	49.53	39.44	11.04	Franco arcilloso
6NA2	49.53	39.44	11.04	Franco arcilloso

Nota: En la tabla se muestran los resultados de la textura del suelo. Fuente: Elaboración propia datos registrados en el Laboratorio Universidad Técnica de Cotopaxi (2025).

A partir de los resultados obtenidos en el análisis textural, se determinó que la mayoría de los suelos (tanto quemados como no quemados) tenían una textura de arcilla limosa. Esta combinación, caracterizada por un equilibrio relativo entre partículas gruesas y finas, proporciona al suelo una estructura moderadamente compacta con capacidad intermedia de retención de agua y nutrientes. Adicionalmente, la proporción significativa de arcillas mezcladas con arena favorece la formación de agregados estables, reforzando la cohesión estructural del suelo. Por ende, esta textura contribuye a una mayor resistencia frente a la erosión superficial, condición particularmente ventajosa en las laderas inclinadas del Cerro Putzalahua.

Mientras tanto, las muestras 2NA1 y 2NA2 (suelos nativos no afectados) tuvieron una textura franco arenosa. Esta característica, asociada a un mayor contenido de arena y una menor proporción de fracción fina, mejora el drenaje y la aireación del perfil edáfico; sin embargo, limita significativamente la capacidad de retención hídrica y nutricional. En consecuencia, este tipo de suelo podría dificultar la regeneración vegetal, especialmente bajo condiciones de estrés hídrico prolongado.

En contraste, el predominio de la textura de arcilla limosa después de la quema podría explicarse por procesos post-incendio como la redistribución superficial de partículas finas favorecida por la pérdida de cobertura vegetal y la escorrentía. Bajo este enfoque, si bien la textura observada indica cierta estabilidad física, es probable que la compactación superficial inducida por el calor del fuego haya reducido parcialmente la porosidad funcional, comprometiendo la infiltración y almacenamiento de agua.

En definitiva, la heterogeneidad textural observada en las muestras está determinada por los efectos combinados del material parental y los procesos geomorfológicos locales. Esta variabilidad no es un aspecto secundario, pues condiciona directamente el comportamiento hidrológico y biogeoquímico del suelo tras eventos de perturbación. Por ello, resulta fundamental considerar la textura como un criterio técnico clave al definir estrategias de manejo y restauración, dado su efecto sobre el flujo de agua, la dinámica de nutrientes y la recuperación de la vegetación nativa.

### 13.1.1. Análisis estadístico de los datos

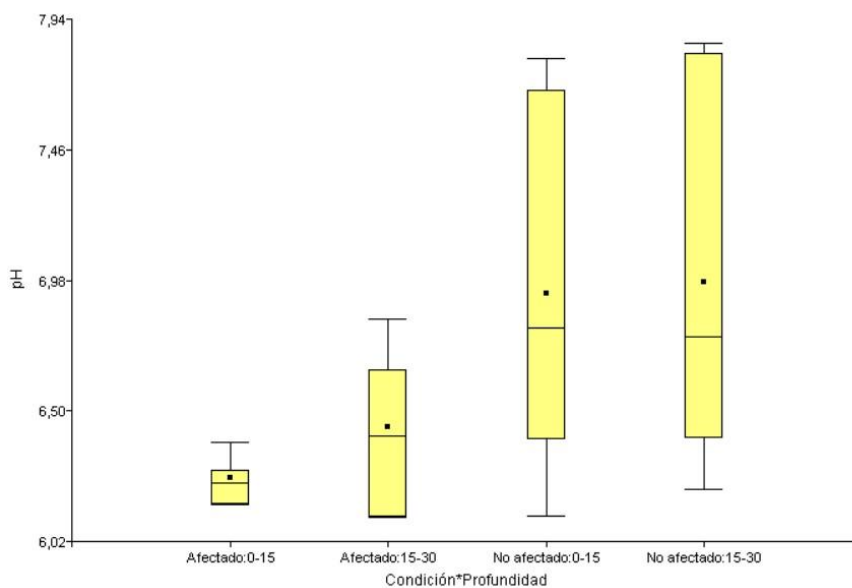
#### a) Análisis estadístico pH.

El análisis estadístico descriptivo del pH a dos profundidades del suelo (0–15 cm y 15–30 cm) en las zonas afectadas y no afectadas se presenta en la Tabla 28. Se utilizó estadísticas descriptivas para la media, desviación estándar y coeficiente de variación para determinar las diferencias en la acidez del suelo entre condiciones.

**Tabla 29.** Análisis estadístico pH.

Cond_Profundidad	Variable	N	Media	D.E.	Var(n)	CV	Min	Max	Mediana
Afectado_0_15	pH	4	6.25	0.11	0.01	1.69	6.15	6.38	6.23
Afectado_15_30	pH	4	6.44	0.36	0.10	5.62	6.10	6.84	6.41
Noafectado_0_15	pH	6	6.93	0.69	0.40	10.01	6.11	7.79	6.81
Noafectado_15_30	Ph	6	6.97	0.71	0.42	10.23	6.21	7.85	6.77

Nota: En la tabla se observa la interpretación estadística de los resultados de Ph. Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos del InfoStaf(2025).



**Figura 11. Análisis estadístico de pH**

**Elaborado por:** Autores

**Interpretación:** Se observa una notable disminución en los valores de pH en los suelos del cerro Putzalhua como resultado de los incendios forestales. En la capa superficial (0–15 cm) de la capa del suelo, el pH registrado fue de 6.25, mientras que en la profundidad subsuperficial (15–30 cm) fue de 6.44. Estos últimos fueron significativamente más bajos que los determinados en suelos de control estables, sin embargo, el pH medio fue de 6.93 y 6.97, respectivamente. Aunque el descenso es leve, evidencia un impacto químico concreto del disturbio térmico sobre el suelo, situando los valores de los suelos quemados cerca del límite inferior del rango considerado aceptable (6.0–8.0) según el Acuerdo Ministerial 097-A, que regula la calidad ambiental del recurso suelo en Ecuador. Según Carrión-Paladines et al., (2023), aunque el fuego de baja severidad en páramos andinos no altera drásticamente el pH a corto plazo, la naturaleza ácida intrínseca de los suelos volcánicos incrementa su vulnerabilidad frente a este tipo de alteraciones cuando la materia orgánica superficial se consume.

Este proceso de acidificación puede atribuirse principalmente a la pérdida de cationes básicos como calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) y potasio ( $\text{K}^+$ ) durante la combustión, sumado a la acumulación de compuestos ácidos generados por la descomposición térmica incompleta. Este patrón coincide con lo reportado Agbeshie et al., (2022), quienes concluyeron que incendios de intensidad media a alta favorecen la acidificación del suelo, especialmente cuando los agregados estabilizados por materia orgánica se desintegran. La reducción de bases intercambiables conduce a un empeoramiento de la capacidad tampón del suelo, influyendo así

en la biodisponibilidad de nutrientes y en un ambiente propicio para el desarrollo de la microbiota del suelo. Desde un punto de vista ecológico, este desequilibrio deteriora la resiliencia del ecosistema, particularmente en áreas vulnerables como el páramo alto andino.

La naturaleza débilmente ácida de los suelos quemados es causada por la disminución de cationes básicos ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ , etc.) después de la quema de materia orgánica, así como por una acumulación de compuestos ácidos que quedan tras una pirólisis incompleta. Aunque los valores de pH no son inferiores a los niveles nacionales para químicos en el suelo; pueden reducir la disponibilidad de algunos nutrientes y los procesos de la biota del suelo; esto puede afectar la fertilidad y la resiliencia de los suelos.

Además, otro dato importante es la reducción observada en el coeficiente de variación del pH ( $\text{CV} < 10.5\%$ ), que sugiere una homogeneización química tras el incendio. Este fenómeno podría interpretarse como consecuencia de la volatilización de materia orgánica y el lavado superficial, procesos que uniformizan el perfil químico del suelo. Coaguila et al., (2025) describieron un efecto similar en los Andes peruanos, donde los incendios favorecieron la pérdida de heterogeneidad edáfica, resultando en suelos más homogéneos, pero menos resilientes. En términos ecológicos, esta homogeneización debería considerarse una señal temprana de degradación funcional, ya que la diversidad química del suelo es clave para sostener procesos biogeoquímicos complejos.

En conjunto, estos resultados muestran que los efectos de la temperatura del fuego en el suelo no solo disminuyen la calidad química del suelo a corto plazo, sino que también pueden amenazar la función ecológica a medio y largo plazo, con potenciales consecuencias a largo plazo para la restauración del ecosistema y la gestión adaptativa, especialmente en el caso donde no se implementan la restauración y la gestión adaptativa.

**Discusión:** Los hallazgos sugieren que el pH fue ligeramente más bajo para los suelos afectados, siendo esta diferencia muy ligeramente menor que en los suelos no afectados, con 6.25 en comparación con 6.93, en promedio, en todo el rango de profundidad de 0–15 cm en todas las capas. Aunque ambos están dentro de los buffers regulados por las normas nacionales (6.0–8.0, Acuerdo Ministerial 097-A), la diferencia entre ellos supera fácilmente las 0.7 unidades, representando un cambio químico significativo para el suelo. Esta disminución, que presenta un cambio a un pH ligeramente ácido, podría estar relacionada con la pérdida de materia orgánica y la lixiviación de cationes básicos como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$ , elementos que usualmente actúan como amortiguadores de pH, los cuales son bastante sensibles a la

volatilización y escorrentía bajo combustión intensa. Esto ha sido extensamente documentado en la literatura y en el caso de las sequías es aún más evidente, considerando el proceso de sucesión de especies vegetales que puede llevar a una recuperación eficiente después del fuego (Vizuete, 2022), señalando que los incendios tienden a desestabilizar el equilibrio químico del suelo y agotar la acción amortiguadora de la materia orgánica, modificando el suelo de una manera que ya no es capaz de mantener los procesos biológicos fundamentales.

Por su parte, los suelos no afectados presentaron un pH más cercano a la neutralidad, acompañado de una mayor variabilidad en los valores. Esta amplitud podría interpretarse como señal de un sistema más dinámico y biológicamente activo. Lo observado coincide con lo planteado por Agbeshie et al. (2022) quienes explican que los incendios de baja intensidad pueden elevar temporalmente el pH debido a la presencia de cenizas, aunque, con el tiempo, la pérdida de materia orgánica tiende a generar una acidificación del suelo.

Este comportamiento también ha sido documentado por (Souza et al., 2022) quienes, en ecosistemas andinos de altitud similar, reportaron una disminución del pH de hasta 0,6 unidades tras incendios, con impactos negativos en la regeneración de especies nativas y en la recuperación de la cobertura vegetal. Asimismo, advierten que estos cambios en la acidez del suelo pueden persistir durante varios años, afectando la sucesión ecológica y favoreciendo la invasión por especies oportunistas.

No obstante, se reconoce la falta de información sobre el monitoreo estacional como una deficiencia de este estudio; el pH dinámico y los cationes intercambiables pueden diferir con las condiciones de agua y biología a lo largo del año. Por lo tanto, se sugirió un análisis adicional tanto en las estaciones secas como lluviosas para definir con mayor precisión la variabilidad natural del suelo y servir como apoyo para la interpretación del efecto del fuego en la química del suelo.

Desde el punto de vista de la gestión ambiental, sugerimos considerar el pH como un indicador objetivo en todos los programas de monitoreo post-incendio. Según el Acuerdo Ministerial 097-A, en tal escenario, se deben adoptar medidas de restauración lo más rápido posible. Se sugiere enmendar el suelo con materia orgánica vegetal y favorecer la revegetación con especies nativas adaptadas para desarrollarse en condiciones ácidas, con el fin de limitar la disminución del pH y restaurar gradualmente las dinámicas biogeoquímicas dentro del ecosistema.

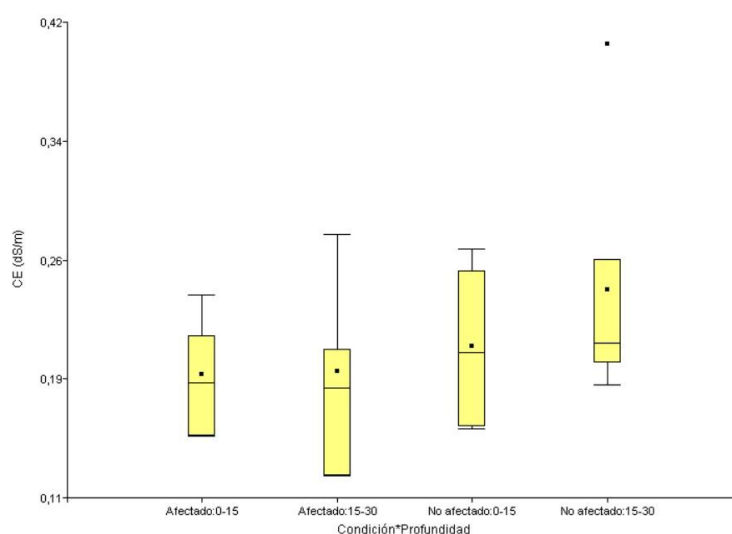
## b) Análisis estadístico CE

La división por condición (afectada y no afectada) y profundidad para el análisis estadístico de la CE del suelo se mostró en la Tabla 29. Se obtuvieron valores como la media, desviación estándar y coeficiente de variación (C.V.), lo que permitió considerar la variabilidad de la concentración de sales solubles.

**Tabla 30.** Interpretación Resultados estadísticos CE

Cond_Profundidad	Variable	N	Media	D.E.	Var(n)	CV	Min	Max	Mediana	Afectado_0_15	CE
(dS/m) 4	0.19	0.05	1.6E-03	24.15	0.15	0.18				0.24	
Afectado_15_30	CE (dS/m)	4	0.19	0.07	3.5E-03	35.87	0.12	0.28	0.18		
Noafectado_0_15	CE (dS/m)	6	0.21	0.05	2.2E-03	24.92	0.15	0.27	0.20		
Noafectado_15_30	CE (dS/m)	6	0.24	0.08	0.01	34.08	0.18	0.4	0.21		

Nota: La tabla presenta la interpretación estadística de los resultados de CE. Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos del InfoStaf (2025).



**Figura 12.** Análisis estadístico CE

**Elaborado por:** Autores

**Interpretación:** Según los resultados, la conductividad eléctrica (CE) del suelo difiere insignificativamente en áreas afectadas por el fuego y no afectadas. Los suelos quemados tenían en promedio 0,19 dS/m, 0,21 dS/m y 0,24 dS/m (superficie y subsuperficie) y en los no quemados 0,21, 0,21 y 0,24 dS/m. Aunque estos valores no superan los umbrales de calidad y pueden ser indicativos de una concentración reducida de sales solubles en suelos afectados por

el fuego, se puede interpretar como un síntoma de empobrecimiento químico por disturbio térmico.

Según la Tabla 1 del Acuerdo Ministerial 097-A, el nivel óptimo de CE para mantener el suelo en buen estado para fines agrícolas es de 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (que es igual a 0,2 dS/m). Considerando esta condición, la CE promedio del suelo E alcanza exactamente el máximo permitido, mientras que en el suelo NA, su valor promedio es de 0,24 dS/m en la profundidad de 15–30 cm, un poco por encima de ello. Aunque este exceso es pequeño y no necesariamente significa una condición de suelo contaminado, podría reflejar un proceso de acumulación natural de sal en estratos profundos por infiltración o por procesos de capilaridad ascendente, particularmente bajo condiciones de pendiente o clima fluctuante.

El porcentaje de variabilidad encontrado en los datos valores de [CV 24,15–35,87 %] es, sin embargo, un reflejo de un escenario edáfico aún en evolución, tal vez transicional. El valor más alto alcanzado en suelo no perturbado a 15–30 cm, en particular, indica una mayor heterogeneidad química que puede asociarse con el patrón natural de enriquecimiento del perfil edáfico en ausencia de perturbación.

**Discusión:** Sorprendentemente, después del incendio, en el área quemada, los valores de CE también fueron constantes o ligeramente inferiores a los anteriores al incendio. El promedio para ambas profundidades (0–15 cm y 15–30 cm) fue de 0,19 dS/m, ligeramente inferior al de los suelos no afectados (0,21 dS/m y 0,24 dS/m, respectivamente). A simple vista, esto parecería contradictorio, porque la quema de materia orgánica generalmente crea cationes como  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y genera un aumento temporal en las sales solubles del suelo.

Sin embargo, esta tendencia podría explicarse por la interacción del aumento de lixiviación y escorrentía superficial, que son típicas en áreas montañosas de alta precipitación con pendientes pronunciadas. En tales condiciones, los iones liberados después de la quema son rápidamente lixiviados del perfil del suelo, reduciendo el contenido de solutos. Esto también es más pronunciado si el evento de incendio ha ocurrido hace algún tiempo, favoreciendo que las lluvias sucesivas lixivien las sales restantes como los suelos trumao andinos después del incendio observado por Vizúete, (2022).

Además, investigaciones como la de Yang et al. (2021) se demostró que la CE aumentó después de la perturbación del incendio y poco después disminuyó con el tiempo, volviendo a su estado original si el incendio es menos intenso, y depende de las características del suelo..

Este comportamiento concuerda con los hallazgos del presente estudio. De forma complementaria, (Souza et al., 2022) mostraron tendencias similares en ecosistemas montañosos andinos, y relacionaron la disminución de la CE con el lavado de sales por precipitación así como con la rápida recuperación de la vegetación, en línea con nuestros resultados.

Pese a ello, es necesario considerar que este estudio se describió en una temporada, lo que puede restringir el perfil preciso de la dinámica de la CE. La fuerte estacionalidad característica de las áreas altas andinas tiene un efecto directo en el transporte de sales, por lo tanto, se recomienda un monitoreo anual que cubra tanto las estaciones secas como húmedas. Al tener en cuenta esta variabilidad, sería posible identificar variaciones naturales y establecer límites más precisos para guiar la interpretación de los resultados.

Desde un punto de vista ecológico, la baja CE observada corresponde con un buen drenaje y lavado del suelo, pero también con la pérdida continua de nutrientes, lo que resulta en la limitación del establecimiento de especies naturales y la colonización del área por vegetación de escombros.

Por lo tanto, la conductividad eléctrica debe considerarse como el parámetro de elección en los programas de monitoreo post-incendio, especialmente durante el primer año después del evento de incendio. En respuesta a valores crónicamente bajos, valdría la pena contemplar técnicas de restauración del suelo que involucren aplicaciones de materia orgánica o biofertilizantes para mejorar la conservación de nutrientes y rehabilitar el rendimiento del suelo

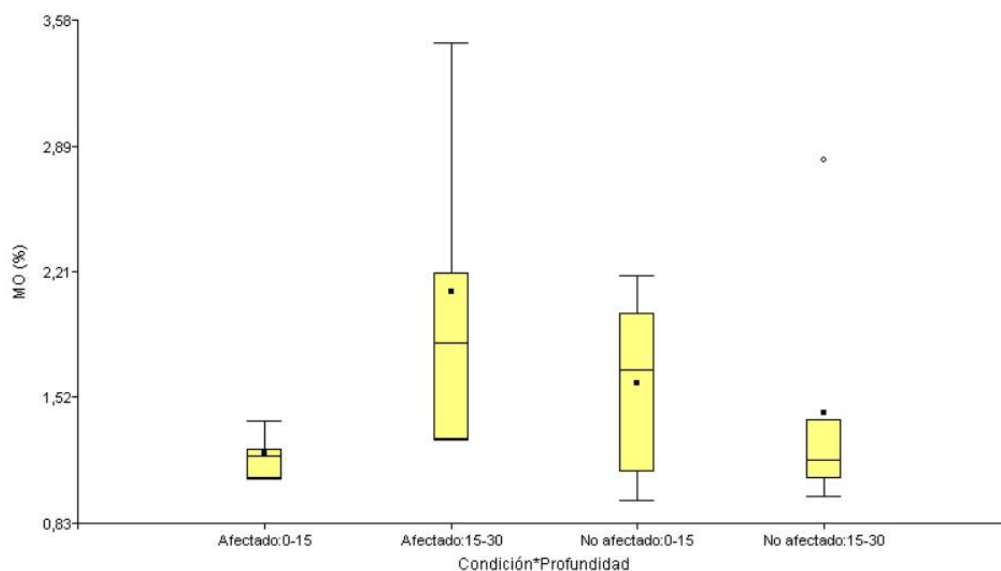
### c) Análisis estadístico MO

La Tabla 30 mostró las estadísticas de la materia orgánica (MO) a dos profundidades y condiciones. Se encontraron valores medios mayores en el sitio afectado, especialmente para la profundidad de 15-30 cm, pero con alta dispersión, como lo demuestra el coeficiente de variación. Estos resultados implicaron que la cobertura de MO era desigual, lo que pudo haber sido determinado por la dinámica postincendio y una fuerza impulsora del depósito de residuos orgánicos.

**Tabla 31.** Interpretación Estadística Mo

Cond	Profundidad	Variable	n	Media	D.E.	Var(n)	CV	Min	Max	Mediana	Afectado_0_15	MO (%)
4	1.21	0.14	0.01	11.19	1.07	1.20					1.39	
Afectado_15_30	MO (%)	4	2.09	0.99	0.74	47.41	1.28	3.46	1.82			
Noafectado_0_15	MO (%)	6	1.60	0.51	0.21	31.83	0.96	2.18	1.67			
Noafectado_15_30	MO (%)	6	1.44	0.69	0.4	48.08	0.98	2.82	1.18			

Nota: Se observa en la tabla la interpretación estadística de los resultados de MO. Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos del InfoStaf (2025).



**Figura 13.** *Análisis estadístico MO*

**Elaborado por:** Autores

**Interpretación:** La materia orgánica (MO) en los resultados obtenidos muestran una disminución generalizada del contenido de materia orgánica (MO) en los suelos superficiales afectados por incendios, donde el promedio registrado fue de apenas 1.21% en el horizonte 0–15 cm, frente al 1.60% observado en los suelos no afectados. Esta pérdida es consistente con lo reportado por Coaguila et al., (2025), quienes evidenciaron que los incendios en ecosistemas de alta montaña en los Andes peruanos reducen significativamente el carbono orgánico del suelo (SOC), debido tanto a la combustión directa como a la erosión posterior al fuego. Según estos autores, el fuego elimina la capa de residuos orgánicos y consume principalmente la fracción más lábil de la materia orgánica, debilitando la cohesión de los agregados edáficos, los cuales dependen de esta fracción como agente cementante.

Esta disminución en la estructura del suelo hace que la porosidad y la conductividad del suelo disminuyan, lo que aumenta la escorrentía superficial, un fenómeno particularmente importante en las condiciones climáticas extremas del páramo del cerro Putzalahua. Por el contrario, en el subsuelo (15–30 cm) se produjo un comportamiento anómalo: los suelos afectados tenían valores de materia orgánica (promedio de 2.09%), incluso superiores a los de

los suelos no afectados. Esta situación podría explicarse como un fenómeno transitorio: la materia orgánica parcialmente pirolizada o los restos finos arrastrados desde la superficie podrían haberse acumulado en capas más profundas, ya sea por lixiviación o redistribución vertical posterior al incendio. Roman et al., (2024) documentaron un patrón similar en pastizales altoandinos de Cusco, donde registraron incrementos esporádicos de MO en horizontes subsuperficiales vinculados al lavado de cenizas y productos de combustión incompleta. No obstante, este aporte adicional en profundidad no necesariamente significa una recuperación ecológica real: el material orgánico relocalizado carece de las propiedades estructurales y bioquímicas propias del horizonte superficial original.

**Discusión:** En los suelos afectados del cerro Putzalahua, se determinó el mayor contenido de materia orgánica, 29%, en la capa subsuperficial, lo que sugiere que el efecto del fuego se limitó a la superficie; es decir, que la pérdida de carbono orgánico ocurrió directamente cuando fue descubierto y quemado. Esa interpretación es consistente con las observaciones reportadas por Coaguila et al., (2025), que mostraron que en los ecosistemas de alta montaña los incendios disminuyen en gran medida la materia orgánica lábil de la superficie mientras que las capas más profundas del suelo eran relativamente estables.

Por otro lado, los suelos no perturbados mostraron un perfil regular con mayor cantidad de materia orgánica en la superficie y una reducción hacia el subsuelo, que es el patrón normal observado en suelos no perturbados como los páramos mencionados por Roman et al., (2024) en los pastizales de Cusco. Este patrón refleja el aporte continuo de hojarasca y las actividades biológicas de la superficie del suelo, que faltan en los sitios quemados.

Sin embargo, incluso si algunas investigaciones indican que la acumulación de cenizas puede causar un aumento transitorio en el carbono de la superficie, tales cambios no se observaron en el estudio actual. Por el contrario, los datos proporcionaron evidencia de un movimiento de carbono a mayor profundidad, probablemente por lixiviación. Roman et al., (2024) interpretan este comportamiento como resultado del arrastre hacia los horizontes inferiores de materia orgánica pirolizada y coloides solubles y proponen que eso justificaría el aumento con la profundidad de la materia orgánica.

A pesar de ello, es relevante mencionar que el estudio se centró en un punto de muestreo, sin tener en cuenta las variaciones estacionales que caracterizan a los ecosistemas de alta montaña. Dado que la precipitación y la actividad biológica fluctúan a lo largo del año, se necesitará trabajo comparativo en distintas estaciones para comprender la dinámica temporal

de la materia orgánica y proporcionar una evaluación más confiable del impacto y la recuperación del suelo.

Sin embargo, el desplazamiento ascendente de estos materiales no mejora la calidad del suelo: la disminución de la materia orgánica superficial significa que el perfil arable tiene menos almacenamiento de humedad y nutrientes, y la susceptibilidad de la superficie del suelo a la erosión ha aumentado, y sus funciones ecológicas se han visto afectadas.

Desde un punto de vista ambiental, y basado en el Acuerdo Ministerial 097-A, la reducción de la materia orgánica superficial representa un peligro significativo para la calidad y estabilidad del ecosistema. Se sugiere proteger los suelos mediante la aplicación de compost estabilizado y la revegetación con especies nativas que tengan una alta biomasa de raíces, así como colocando barreras físicas que conduzcan a la acumulación de materia orgánica en la superficie del suelo para restaurar el carbono perdido y estabilizar el suelo.

#### d) Análisis estadístico Nutrientes

El resumen estadístico para los macronutrientes potasio (K), calcio (Ca) y sodio (Na) bajo diferentes tratamientos y profundidades se presentó en las Tablas 31, 32 y 33. En general, los valores medios más altos de K y Ca en la capa superficial en suelos afectados podrían ser el resultado de la disponibilidad de nutrientes tras la combustión de materia orgánica. Para Na, no hubo diferencia estadística entre las áreas; sin embargo, se observaron concentraciones ligeramente más altas en suelos afectados, lo que indica cierta acumulación superficial. La alta variabilidad en todos los casos indicó heterogeneidad de estos elementos en el perfil del suelo.

**Tabla 32.** Interpretación estadística Nutriente Potasio (K)

Cond_Profundida d	Variabl e	n	Medi a	D.E.	Varin )	CV	Min	Max	Median a
Afectado_0_15	K (ppm)	4	229.5 8	18.3 8	253.30	8.00	205.0 0	246.6 7	233.33
Afectado_15_30	K (ppm)	4	227.0 8	20.0 2	300.52	8.81	203.3 3	250.0 0	227.50
Noafectado_0_15	K (ppm)	6	183.0 5	22.0 0	405.02	12.0	145.0 5	210.0 5	186.67
Noafectado_15_30	K (ppm)	6	176.6 7	19.2 6	309.26	10.9	145 7	195 6	180

Nota: Tabla donde se visualiza la interpretación estadística del nutriente Potasio (K). Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos del InfoStaf (2025).

Los contenidos de potasio en suelos afectados por el fuego se compararon con los no afectados, y en la capa superficial y en profundidad la cantidad registrada es mayor. Esto muestra que la quema lixivió potasio del material orgánico y de las cenizas. Aunque este aumento es beneficioso para la fertilidad a corto plazo, si no se controla podría causar desestabilización. Por lo tanto, se debe monitorear el estado del potasio a lo largo del tiempo y se deben fomentar prácticas de suelo para estabilizar el nivel de potasio en el suelo.

**Tabla 33.** *Análisis estadístico nutriente Calcio (Ca)*

Cond_Profundidad	Variable	n	Media	D.E.	Var(n)	CV	Min	Max	Mediana
Afectado_0_15	Ca (ppm)	4	240.00	38.80	1129.17	16.17	195.00	283.33	240.83
Afectado_15_30	Ca (ppm)	4	236.25	36.09	976.91	15.28	193.33	275.00	238.33
Noafectado_0_15	Ca (ppm)	6	140.83	43.64	1586.81	30.98	85.00	200.00	140.00
Noafectado_15_30	Ca (ppm)	6	132.5	37.74	1186.81	28.48	83.33	190.00	134.17

Nota: Tabla donde se visualiza la interpretación estadística del nutriente Calcio (Ca). Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos del InfoStaf (2025).

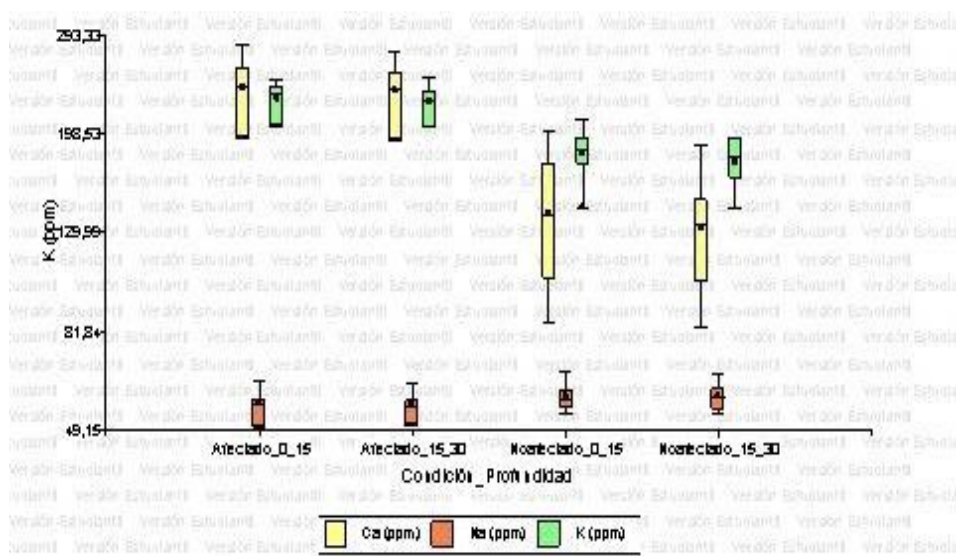
En los suelos afectados, el calcio mostró valores más altos que en los no afectados, especialmente en la superficie. Esto sugiere que el fuego fue una fuente de calcio, quizás proveniente de las cenizas y del material orgánico quemado. Aunque este aumento apoya la fertilidad a corto plazo, niveles elevados pueden alterar el equilibrio del suelo. También es necesario monitorear el calcio ya que puede obstaculizar la absorción de otros nutrientes importantes.

**Tabla 34.** *Análisis estadístico nutriente Sodio (Na)*

Cond_Profundidad	Variable	n	Media	D.E.	Var(n)	CV	Min	Max	Mediana
Afectado_0_15	Na (ppm)	4	56.67	5.72	24.50	10.09	50.00	63.67	56.50
Afectado_15_30	Na (ppm)	4	56.17	5.20	20.25	9.25	50.33	62.67	55.83
Noafectado_0_15	Na (ppm)	6	58.89	4.84	19.51	8.22	54.00	67.00	58.17
Noafectado_15_30	Na (ppm)	6	58.94	4.58	17.5	7.77	54.00	66.00	58.83

Nota: Tabla donde se visualiza la interpretación estadística del nutriente Sodio (Na). Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos del InfoStaf (2025).

El contenido de sodio también fue similar para ambos suelos, afectados y de control, alrededor de 57 (ppm). Esto significa que el incendio no causó una liberación excesiva de este elemento. Sin embargo, el sodio es un nutriente cuyos niveles deben ser monitoreados, ya que niveles altos son perjudiciales para la estructura del suelo. Por lo tanto, se recomienda estar atento a su evolución para evitar la salinización a largo plazo.



**Figura 14. Análisis estadístico de nutrientes**  
**Elaborado por: Autores**

**Interpretación:** En términos generales, los niveles de potasio (K) presentan valores promedio más altos en los suelos afectados en comparación con los no afectados, sobre todo en la capa superficial (0-15 cm), como lo ilustran la Tabla 23 y la Figura 11. El hecho de que esto ocurra probablemente se deba al potasio liberado de la materia orgánica durante la combustión y depositado como cenizas, como han informado muchos otros autores, Merino et al., (2025). Sin embargo, el alto coeficiente de variación indica una distribución extremadamente variable, que puede ser causada por diferentes características de lixiviación o diferentes intensidades de fuego que pueden inferirse entre sectores. En consecuencia, el aumento de potasio debería ser un signo de recuperación parcial de este nutriente disponible, pero con un comportamiento difuso y no bien distribuido.

En contraste, el análisis del calcio (Ca), reflejado en la Tabla 24 y también en la Figura 11, muestra un patrón distinto. En regiones no impactadas, los niveles promedio de calcio son sustancialmente más bajos y especialmente en capas subsuperficiales poco profundas. Esto se debe a la falta de carbonatos en la alteración de las cenizas y la falta del efecto térmico que causa la liberación del CO<sub>2</sub>, como menciona Cheng, (2021). Por el contrario, en suelos saturados, los contenidos elevados de calcio pueden actuar como una amenaza para causar un desequilibrio iónico cuando no se realiza una gestión adecuada, lo que lleva a un desequilibrio en la nutrición de las plantas.

En cuanto al sodio (Na), a partir de los valores de la Tabla 25 podemos ver que sus contenidos no cambian significativamente en ningún caso, mostrando niveles dentro de la

mediocridad en términos de la Tabla 9. Sin embargo, el Acuerdo Ministerial 097-A establece que se deben monitorear los altos niveles de este elemento, porque su aumento continuo puede llevar al deterioro de la estructura y limitar su productividad en áreas de pendientes y alta pluviosidad como en el cerro Putzalahua. La falta de un proceso de salinización significativo asociado después del incendio se evidencia por tal comportamiento observado, pero aún es necesaria una vigilancia preventiva para evitar una posible acumulación progresiva futura de sodio.

**Discusión:** Los resultados del presente estudio indican que las concentraciones de calcio (Ca) y potasio (K) se mantuvieron altas en los suelos quemados del cerro Putzalahua, mientras que el sodio (Na) es medio o alto en algunos puntos. Esta tendencia coincide parcialmente con los resultados reportados para incendios en bosques mediterráneos por Navidi et al., (2022), donde el incremento inicial de estos cationes está vinculado a la liberación de sales de la biomasa quemada. Sin embargo, en el caso de los suelos volcánicos andinos, parece que esta respuesta se ve potenciada, ya que estos suelos tienen un alto nivel de porosidad y una baja capacidad de retención de cationes. Estas características de los suelos de páramo los hacen aptos para el rápido agotamiento de nutrientes necesarios por lixiviación, lo que podría retrasar severamente la recuperación de la vegetación nativa, particularmente en las laderas más expuestas. Desde este punto de vista basado en la ciencia, fue desde un punto de vista práctico (y también ambiental) factible implementar políticas como el enfardado vegetativo y coberturas de suelo que puedan contribuir a retener las cenizas y minimizar la acidificación aumentada del suelo.

En cambio, los resultados encontrados en este estudio contrastan con lo señalado por Arunrat et al., (2024). En sistemas agrícolas tropicales bajo quemas controladas, estos autores encontraron un aumento sostenido del potasio sin que ello derivara en problemas importantes de salinización o pérdida de estructura del suelo. En el cerro Putzalahua, sin embargo, el incremento de K parece ser más bien pasajero y susceptible a pérdidas por escurrimiento, probablemente debido a la combinación de pendientes pronunciadas y precipitaciones relativamente intensas. A esto se suma el hallazgo de sodio alto en ciertas áreas, lo cual representa un indicio temprano de degradación físico-química, ya que este catión favorece la dispersión de arcillas y la ruptura de los agregados del suelo, especialmente en contextos volcánicos con materiales amorfos. Desde un punto de vista ecológico, este escenario podría facilitar el establecimiento de especies vegetales colonizadoras oportunistas, desplazando la flora nativa característica del páramo. Por lo tanto, es recomendable intervenir con técnicas de restauración que incluyan la siembra de especies pioneras adaptadas a suelos alterados, junto

con la incorporación de enmiendas minerales como ceniza estabilizada o roca pulverizada para mejorar la estabilidad química y física del suelo.

Por otro lado, el estudio de Oliva et al., (2025), refuerza las señales de alerta detectadas en este trabajo. Estos autores demostraron que la acumulación de potasio y sodio después de incendios, especialmente en la capa superficial del suelo, altera significativamente las comunidades microbianas, disminuyendo la actividad de hongos y comprometiendo el reciclaje de nutrientes. Para el Cerro Putzalahua, este asunto puede ser aún más sensible, ya que los suelos de páramo son, en su conjunto, suelos con baja actividad biológica y con poca capa fértil. Esto puede significar que la resiliencia del ecosistema podría estar en gran peligro. Por lo tanto, se aconseja estimular la recuperación del suelo mediante la aplicación de compost enriquecido con hongos micorrízicos para la reactivación del ciclo natural de nutrientes y mejoras en la fisicalidad del suelo.

Similar a lo planteado por Moreno et al. (2025), también enfatizan que los métodos colorimétricos, aunque adecuados para análisis iniciales, tienen limitaciones de sensibilidad y precisión para bajas concentraciones, indicando que el monitoreo de cationes, como el sodio en el cerro Putzalahua, puede estar limitado con técnicas básicas de campo. En tal escenario, un enfoque solo en métodos rápidos podría subestimar aumentos puntuales o fluctuaciones estacionales, disminuyendo, por lo tanto, la capacidad de detectar oportunamente procesos incipientes de salinización. Es aconsejable complementar el monitoreo rutinario con métodos analíticos más precisos, como la espectrometría de absorción atómica o la cromatografía iónica, para diagnosticar con precisión el equilibrio iónico del suelo y desarrollar estrategias preventivas de acuerdo con el diagnóstico (Moreno et al., 2025).

Finalmente, aunque los niveles actuales de Ca, K y Na no superan los límites establecidos por el Acuerdo Ministerial 097-A, la tendencia a un desequilibrio químico es una señal temprana de degradación funcional de este suelo. En este sentido, es necesario implementar un programa periódico de monitoreo del equilibrio iónico, que será óptimo de manera semestral y en el cual se prestará especial atención al control del sodio en las áreas más afectadas y a la recuperación del potasio mediante el manejo adecuado de la materia orgánica. Estas intervenciones no solo recuperarían la fertilidad del suelo, sino que también mantendrían la integridad ecológica de este ecosistema altoandino, favoreciendo su recuperación a largo plazo.

#### **e) Análisis estadístico Nutrientes N y P**

## Diferencia porcentual

### Fórmula:

$$valor\ mayor - Dp = \left( \frac{\quad}{valor\ mayor} \right) \times 100 \quad valor\ menor \quad (9)$$

La tabla 34, presentó la comparación de la diferencia porcentual entre las concentraciones de nitrógeno (N) y fósforo (P) en las áreas afectadas y no afectadas. El contenido restante de N y P (en orden de 33.55 y N 31.48%) en el sitio quemado disminuyó 11.62% en N y 10.39% en P. Estas diferencias indicaron un agotamiento moderado de algunos nutrientes, probablemente relacionado con la quema de materia orgánica y el lixiviado postincendio.

**Tabla 35.** *Análisis de diferencia porcentual*

Nutrientes D%	
N (ppm)	P (ppm)
65.67	7.35
74.30	8.22
11.62%	10.39%

Nota: Tabla donde se presenta el análisis de diferencial porcentual de los nutrientes N y P. Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos del InfoStaf (2025).

**Interpretación:** Los resultados obtenidos para nitrógeno (N) y fósforo (P) en los suelos analizados reflejaron diferencias cuantitativas entre las condiciones evaluadas, aunque ambos elementos permanecieron dentro del rango clasificado como “bajo”, conforme a los criterios establecidos en el Acuerdo Ministerial 097-A. Específicamente, el contenido de nitrógeno en los suelos afectados fue de 74,30 ppm, frente a 65,67 ppm en los no afectados. En cuanto al fósforo, los valores oscilaron entre 7,35 ppm en suelos no afectados y 8,22 ppm en los suelos impactados por el fuego.

Ambos elementos se ubicaron por debajo de los umbrales establecidos para un nivel “medio” de fertilidad (N < 500 ppm y P < 5–30 ppm), lo que sugiere una disponibilidad naturalmente limitada en el ecosistema evaluado, independientemente de la condición de afectación por incendios forestales.

**Discusión:** Esta tendencia se ha reflejado en la investigación reciente. Merino et al. (2025) señalan que después de un incendio, los fuegos de intensidad moderada pueden inducir la

liberación no solo de N, sino también de P, especialmente de N y P en los pocos centímetros superiores del suelo debido a la combustión parcial de materia orgánica y la descomposición térmica de residuos vegetales. Este estallido causa un aumento en la abundancia de tales elementos cosmogénicos en el ambiente poco después del evento, generando un período relativamente corto de fertilidad superficial mejorada. Sin embargo, este efecto es muy temporal. Los investigadores advierten que, en ausencia de cobertura vegetal, la acción directa de la lluvia y el viento aumenta los procesos de erosión y lixiviación, lo que resulta en una pérdida significativa de nutrientes importantes. Esto concuerda con nuestra observación en el presente estudio, donde los suelos no afectados tenían niveles más altos de N y P (74.30 ppm y 8.22 ppm) en comparación con los suelos quemados, que también se redujeron significativamente a un nivel de 65.67 ppm (N) y un nivel de 7.35 ppm (P), lo que representa una pérdida del 11.62 % y 10.39 %, respectivamente. Esta cifra, aunque baja, es una alarma importante para la vulnerabilidad química del suelo post-incendio (principalmente en contextos montañosos como el Cerro Putzalahua).

Cheng, (2021) también aborda la dinámica del fósforo post-incendio, enfatizando que la persistencia de P en suelos afectados por incendios es un caso bastante variable y determinado por numerosos controles edáficos y/o ecológicos. De estos, la pendiente del terreno es un factor importante porque la escorrentía superficial es más probable que movilice partículas enriquecidas con fósforo, particularmente aquellas vinculadas a coloides orgánicos y minerales de arcilla, en paisajes con pendientes pronunciadas. A esto se debe agregar la vegetación previa particular, cuya calidad de biomasa y contenido inicial de nutrientes condicionan la composición química de las cenizas producidas. La intensidad del fuego (a su vez) influye en si el fósforo se retiene como disponible (es decir, ortofosfatos) o se transforma en compuestos insolubles. Es de tal entorno pausado que sigue una alta variabilidad que a menudo impide la efectividad de la regeneración natural, ya que las especies vegetales que tienen conjuntos específicos de nutrientes en sus requerimientos se encuentran con un entorno de crecimiento empobrecido e inestable de baja capacidad de retención.

Desde un punto de vista ecológico, los bajos niveles de N y P son una restricción crucial para la restauración ecológica de áreas quemadas. Estos nutrientes son los recursos del suelo que no solo son esenciales para la síntesis de proteínas, ácidos nucleicos y tejidos estructurales en las plantas, sino que también condicionan la actividad microbiana del suelo y el proceso de ciclos biogeoquímicos. Su ausencia también interfiere directamente con la regeneración de especies nativas, porque su competitividad contra malezas o especies oportunistas es menor en

un suelo débil. Esto puede obstaculizar o prevenir la sucesión, dando lugar a parches degradados a largo plazo que requieren intervención para funcionar.

Además, desde un punto de vista ambiental, la baja concentración de nitrógeno y fósforo constituye un factor limitante para la recuperación ambiental de la zona, pero especialmente para la regeneración natural de las plantas nativas que necesitan un cierto contenido de nutrientes para su establecimiento y desarrollo. Por lo tanto, se aboga por utilizar prácticas de restauración que involucren enmiendas orgánicas y fertilizantes naturales, con el fin de mejorar la biodisponibilidad de estos nutrientes en el suelo.

De manera similar, el Acuerdo Ministerial 097-A justifica la necesidad de un monitoreo continuo de los parámetros de fertilidad en áreas bajo restauración ecológica. En este sentido, se podría establecer un sistema de monitoreo de 6 meses para evaluar la evolución de la fertilidad del suelo a mediano plazo y tomar decisiones informadas sobre el ajuste de estrategias de manejo basadas en la función del ecosistema.

#### f) Análisis estadístico Textura

Las Tablas 35, 36 y 37 mostraron que la textura del suelo se mantuvo estable entre zonas afectadas y no afectadas. La arena fue la fracción predominante, seguida de la arcilla y en menor medida el limo. Los coeficientes de variación fueron bajos, lo que indica una distribución homogénea y sin alteraciones significativas atribuibles al incendio forestal.

**Tabla 36.** Análisis estadístico textura variable- %arena

Cond_	Profundidad	Variable	n	Media	D.E.	Var(n)	CV	Min	Max	Mediana	Afectado_0_15	%arena
4	49.21	1.81	2.44	3.67	49.69					46.80	50.67	
Afectado_15_30	%arena	4	49.21	1.81	2.44	3.67	46.80	50.67	49.69			
Noafectado_0_15	%arena	6	50.67	2.15	3.85	4.24	49.03	54.80	50.00			
Noafectado_15_30	%arena	6	50.67	2.15	3.85	4.24	49.03	54.8	50.00			

Nota: Presentación de la estadística de textura variable-%arena. Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos del InfoStaf(2025).

La proporción de arena fue ligeramente mayor en los suelos no quemados, superando el 50 %, mientras que en los quemados se mantuvo alrededor del 49 %. Esto indica que el fuego no alteró significativamente el componente arenoso del suelo. Sin embargo, como regla general, las arenas predominan y solo la investigación del "factor limo" debería hacernos esperar lo contrario. Por lo tanto, se propone el uso de coberturas vegetales y materia orgánica para aumentar la capacidad de retención y estabilidad del suelo.

**Tabla 37.** *Análisis estadístico textura variable- %Arcilla*

<b>Cond</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Variable</b>	<b>n</b>	<b>Media</b>	<b>D.E.</b>	<b>Var(n)</b>	<b>CV</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Mediana</b>	<b>Afectado_0_15</b>	<b>%arcilla</b>
4	39.6	0.9	0.61	2.28	39.36					38.87	40.8	
Afectado_15_30	%arcilla	4	39.60	0.90	0.61	2.28	38.87	40.80	39.36			
Noafectado_0_15	%arcilla	6	38.87	1.08	0.96	2.77	36.80	39.69	39.21			
Noafectado_15_30	%arcilla	6	38.87	1.08	0.96	2.77	36.8	39.69	39.21			

Nota: Presentación de la estadística de textura variable-%Arcilla. Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos del InfoStaf(2025).

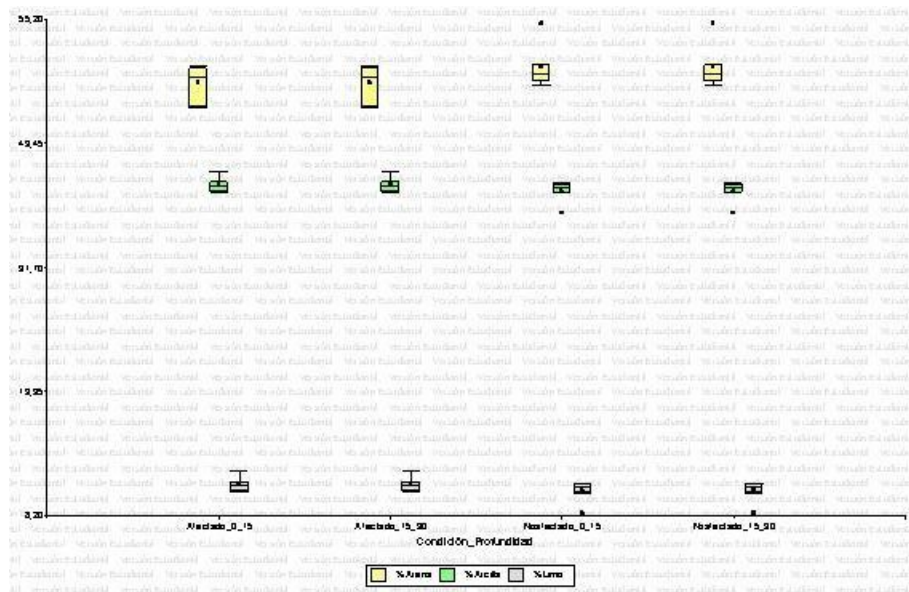
La cantidad de arcilla fue muy similar para suelos susceptibles y tolerantes; el promedio fue alrededor del 39 %. Esto puede deberse al hecho de que el fuego tuvo un efecto insignificante en la fracción de arcilla del suelo. Pero la arcilla ayuda a mantener los nutrientes y la estructura en el suelo. Por lo tanto, la conservación de esta fracción inmóvil sería beneficiosa en la recuperación del suelo después del incendio.

**Tabla 38.** *Análisis estadístico textura variable- %Limo*

<b>Cond</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Variable</b>	<b>n</b>	<b>Media</b>	<b>D.E.</b>	<b>Var(n)</b>	<b>CV</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Mediana</b>
Afectado_0_15	%Limo	4	11.2	0.90	0.61	8.05	10.47	12.40	10.96	
Afectado_15_30	%Limo	4	11.2	0.90	0.61	8.05	10.47	12.40	10.96	
Noafectado_0_15	%Limo	6	10.47	1.08	0.96	10.27	8.40	11.29	10.81	
Noafectado_15_30	%Limo	6	10.47	1.08	0.96	10.27	8.40	11.29	10.81	

Nota: Presentación de la estadística de textura variable-%aLimo. Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos del InfoStaf(2025).

La proporción de limo fue relativamente baja y no fue estadísticamente diferente entre suelos infectados y no infectados; los valores medios fueron de aproximadamente el 11 % cada uno. Esto da crédito a la suposición de que el fuego no afectó mucho a esta fracción. El limo no retiene agua, solo proporciona algo de retención del suelo. Por lo tanto, es positivo para su estabilidad que la estructura superficial se mantenga incluso después del incendio.



**Figura 15.** Análisis estadístico de textura

Elaborado por: Autores

**Interpretación:** Los resultados del análisis textural revela que, tanto en los suelos afectados como en los no afectados del cerro Putzaluhua, predomina una textura que varía de francoarenosa a franco-arcillosa. Este perfil, caracterizado por un alto contenido de arena (49–50 %), seguido por arcilla (38–39 %) y con proporciones menores de limo (10–11 %), es bastante representativo de los suelos volcánicos de alta montaña, formados a partir de materiales piroclásticos poco evolucionados. Esta apariencia física es responsable de una baja capacidad de retención de agua y de la potencial susceptibilidad a la sequía. Este tipo de suelo es particularmente sensible a la pérdida de agregados estables después del fuego (Navidi et al., 2022), El calor severo y la descomposición de la materia orgánica causan un deterioro de las fuerzas de unión entre las partículas finas, lo que lleva a una reducción en la estructura del suelo. Desde un aspecto ambiental, esto puede ralentizar la infiltración de agua y promover procesos de erosión de la superficie terrestre, con peligro potencial para la estabilidad del ecosistema de páramo.

Por otro lado, Oliva et al., (2025) destacan que en suelos afectados por incendios, la textura determina directamente la recuperación química y biológica del suelo. En su trabajo en el Mediterráneo, mostraron cómo estos son suelos con alto contenido de arena y estructura que es frágil y que pierde nutrientes y actividad microbiana rápidamente, lo que da pocas posibilidades de recuperación de la vegetación. Este problema se agrava en el páramo andino por la preferencia por el drenaje rápido de la textura franco-arenosa, ya que la baja capacidad del suelo para retener agua y nutrientes puede causar un retraso considerable en la recuperación funcional

del ecosistema tras una perturbación térmica. Ecológicamente, esta susceptibilidad física no solo informa el presente, sino que también aumenta el riesgo de futuros incendios o episodios erosivos.

Por último, se encontró que varias partículas gruesas en la superficie del suelo son significativas en la gestión de la restauración del suelo. No es el tipo de suelo que retiene agua y nutrientes por sí solo, por lo que cualquier rehabilitación necesitaría conservar la humedad del suelo y protegerlo de la erosión. Prácticas como el acolchado orgánico, la revegetación rápida con especies nativas de raíces finas y cobertura densa, así como el monitoreo continuo de las características texturales del horizonte superficial, son recomendables para asegurar la estabilidad estructural y, en consecuencia, el avance del proceso de recuperación ecológica.

**Discusión:** La textura registrada en los suelos del cerro Putzalahua, dominada por proporciones similares de arena y arcilla, refleja las características típicas de suelos volcánicos en ecosistemas altoandinos: materiales poco evolucionados y una estructura frágil. Esta tendencia concuerda con lo reportado por Carrión et al. (2023) quienes informaron que en los páramos del sur de Ecuador, los suelos bajo pastizales quemados mantenían una textura franco-arenosa, impulsada por depósitos piroclásticos frescos y una mayor porosidad. Esta organización arquitectónica, si bien evita la capacidad del suelo para almacenar agua y nutrientes, aumenta su fragilidad ecológica postincendio al inhibir su resistencia a procesos erosivos y otros procesos degradativos.

Por otro lado, Agbeshie et al. (2022) advierten que este comportamiento no es generalizable a todos los ecosistemas. En su estudio en ambientes mediterráneos, encontraron que suelos más arcillosos mantenían su estabilidad estructural incluso tras incendios severos, lo cual atribuyen a la presencia de cementantes inorgánicos como óxidos de hierro y aluminio. Esta diferencia respecto a los suelos de páramo se explica por el hecho de que aquí los agregados edáficos dependen principalmente de la materia orgánica y complejos organometálicos, componentes vulnerables al calor. Ante disturbios térmicos, estos enlaces se rompen con facilidad, favoreciendo la desagregación y el arrastre de partículas finas, lo que debilita la capa superficial del suelo. Así, mientras que en zonas templadas la textura puede permanecer relativamente estable, en ecosistemas altoandinos los incendios afectan directamente la estructura superficial del suelo.

Además, estudios como el de Coaguila et al. (2025) aportan evidencia desde los Andes peruanos. Informaron grandes pérdidas de partículas finas en condiciones de sitios áridos

postincendio que llevaron a un aumento en las tasas de erosión. Al igual que en el cerro Putzalahua, el mayor porcentaje de arena (en comparación con arcilla y limo) en estos suelos volcánicos fomentó una pérdida de agregación, un aumento en la densidad aparente, así como una reducción en la capacidad de retención en campo. Estos resultados son consistentes con la hipótesis de que, en suelos de alta montaña, particularmente aquellos que no están adaptados al fuego, la textura de la matriz del suelo puede desempeñar un papel clave como factor condicionante de la estabilidad ecológica post-incendio, y por lo tanto, la susceptibilidad al sellado superficial, escorrentía y pérdida de nutrientes.

Desde una perspectiva ecológica, la textura reconocida en el cerro Putzalahua expresa una formidable barrera para la recuperación del ecosistema natural. A la luz del Acuerdo Ministerial 097-A, suelos como los descritos aquí requieren atención específica en las formulaciones que establecen planes de restauración, en la medida en que tienen poca capacidad para retener agua y son altamente susceptibles a la erosión. Por lo tanto, se aconseja instalar rápidamente coberturas vegetativas con altas enmiendas de pastos nativos que tengan un alto desarrollo radicular, acolchado orgánico para proteger el suelo contra la rápida pérdida de humedad, para estabilizar el suelo superficial. También se recomienda que se realice un monitoreo de la textura del horizonte superficial como una medición indirecta de la recuperación estructural del suelo y el impacto de los tratamientos aplicados.

### **13.2. Propuesta de estrategias sostenibles para el mejoramiento y restauración de la calidad del suelo en el Cerro Putzalahua.**

#### **Introducción**

Tras un incendio forestal, el suelo inicia un proceso complejo de transformación y lenta recuperación, en el cual sus propiedades fisicoquímicas se ven profundamente alteradas. Aunque a simple vista pueda parecer que nada cambia, bajo la superficie ocurren dinámicas que requieren atención técnica y monitoreo continuo. Contar con lineamientos claros para interpretar estos cambios es clave para evitar diagnósticos erróneos y tomar decisiones acertadas en el manejo post-incendio (Cheng et al., 2024).

Esta propuesta busca justamente establecer estrategias prácticas y sostenibles para la mejora y restauración de suelos afectados por incendios en ecosistemas altoandinos, como el cerro Putzalahua. A partir de evidencia reciente que destaca el valor de los bioinsumos locales, las coberturas vegetales y las enmiendas orgánicas como mecanismos de recuperación edáfica

(Clavijo et al., 2025), se plantean acciones específicas según el parámetro físico o químico alterado.

La metodología se apoya en investigaciones aplicadas en contextos similares, como los páramos evaluados por (Rodríguez et al., 2022) donde, pese a una severidad baja del fuego, los impactos edáficos se mantuvieron en el tiempo. Bajo este enfoque, la tabla que se presenta a continuación sintetiza estrategias diferenciadas para parámetros clave como el pH, la materia orgánica, la conductividad eléctrica y los nutrientes esenciales. Se priorizan intervenciones ajustadas al contexto local, de bajo costo y con potencial de replicabilidad en otras zonas andinas con características similares.

**Objetivo:**

Proponer estrategias sostenibles orientadas al mejoramiento y restauración de la calidad fisicoquímica del suelo en el cerro Putzalahua, considerando los efectos persistentes de incendios forestales y los principios de manejo ecológico adaptado al ecosistema.

**Tabla 39.** *Propuestas de estrategias mejoramiento del suelo*

Parámetro	Estrategia	Actividades	Resultados esperados	Medio de verificación
<b>Parámetros Químicos</b>				
pH	Estabilización del pH en suelos post-incendio mediante prácticas locales	<ol style="list-style-type: none"> <li>Producción y uso de biofermentos caseros con insumos locales (estiércol, melaza, salvado).</li> <li>Siembra de especies nativas como <i>Trifolium repens</i> o <i>Chusquea</i> sp. para proteger laderas y retener humedad.</li> <li>Mantener el uso de cal agrícola en dosis controladas y de acuerdo con un diagnóstico del suelo.</li> <li>Adopción de leguminosas en cercas vivas para inducir la acumulación de materia orgánica.</li> <li>Plantación de especies nativas que ayuden al suelo a recuperar su equilibrio químico de manera natural.</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Incremento gradual del pH hacia niveles óptimos (6.5–7), menor acidez en superficie y reactivación de la vida microbiana.</li> <li>- Neutralización de ácidos en suelos ácidos en pH.</li> <li>- El aumento de la actividad microbiana y la estabilización del pH a mediano plazo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Semestral del pH in situ y de laboratorio,</li> <li>-Fichas técnica: registros</li> <li>-Fotográficos c</li> </ul>
MO	Reposición de materia orgánica perdida a través de insumos accesibles y prácticas agroecológicas adaptadas al contexto local.	<ol style="list-style-type: none"> <li>Incorporación de compost orgánico producido comunitariamente a partir de residuos agrícolas y estiércol local.</li> <li>Se promoción de la siembra de abonos verdes como <i>Vicia sativa</i> o <i>Lupinus mutabilis</i> para generar biomasa y proteger el suelo.</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Se proyecta un aumento gradual del contenido de materia orgánica (MO) por encima del 2 %, con mejoras en la estructura del suelo y mayor capacidad de retención de agua y nutrientes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Registros análisis de sobre materia orgánica.</li> <li>-Fichas aplicación de compost.</li> </ul>

-Evidencias  
fotográficas

---

<b>Parámetro</b>	<b>Estrategia</b>	<b>Actividades</b>	<b>Resultados esperados</b>	<b>Medio de verificación</b>
		<p>3. Prevención de la quema imprudente de residuos agrícolas a través de programas educativos y participación comunitaria.</p> <p>4. Sistemas agroforestales con plantación de especies leguminosas y cobertura protectora.</p> <p>5. Trabajo mediante la construcción de terrazas vivas en zonas inclinadas para evitar deslizamientos de tierra y ayudar a acumular derrames orgánicos.</p>	<p>-Conservación de materia orgánica en la superficie y mejora de la retención de agua.</p>	<p>-Inventarios y encuestas</p>

Nutrientes	Enriquecimiento del suelo con nutrientes esenciales a través de prácticas de bajo costo y manejadas localmente.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aplicación puntual de Ca y K provenientes de cenizas controladas de plantas vegetales añadidas al suelo a tiempo, bajo orientación técnica.</li> <li>2. Siembra de leguminosas como abono verde para la reducción biológica de nitrógeno.</li> <li>3. Bioinsumos a preparar a partir de leguminosas fermentadas/con el residuo de leguminosas como material que contiene nitrógeno y potasio de fácil disponibilidad para su uso.</li> <li>4. Rotación de cultivos con especies mejoradoras del suelo (por ejemplo, canavalia, avena negra).</li> </ol>	<p>-Se prevé una disponibilidad de macronutrientes (N, P, K, Ca), con un aumento en la fertilidad natural del suelo y una regeneración más energética de la cobertura vegetal.</p> <p>- Suministro continuo de nutrientes de fuentes menos volátiles y reciclaje de residuos vegetales.</p> <p>- Aumento de la disponibilidad de N, P y K principalmente en las zonas tratadas.</p>	<p>-Se recopilarán resultados analíticos sobre el contenido de nutrientes</p> <p>-Bitácoras de las prácticas implementadas.</p> <p>-Seguimiento fotográfico</p> <p>- Fichas de manejo</p>
------------	---	---	---	---

Parámetro	Estrategia	Actividades	Resultados esperados	Medio de verificación
		5. El uso de una barrera viva para interceptar la lixiviación de nutrientes por escorrentía superficial.		

**Parámetros físicos**

<p>CE</p>	<p>Regulación del equilibrio salino de los suelos que presenta aumentos de conductividad eléctrica de incendios. (CE) de</p>	<p>1. Fortalecimiento de la lixiviación controlada de sales mediante el riego con agua de lluvia recolectada a nivel de agricultores, utilizando agua de lluvia almacenada en la comunidad.</p> <p>2. La cobertura viva con pastos locales como <i>Panicum maximum</i> o <i>Setaria sphacelata</i> se implementará para proteger la cobertura del suelo, romper las gotas de lluvia y retardar el salpicado de la lluvia en la superficie, así como reducir la evaporación.</p> <p>3. La adopción de riego por goteo o aspersión controlada en cultivos, sin exceso de riego, puede movilizar sales a la superficie.</p> <p>4. Apoyo a la capacitación comunitaria sobre el uso del agua y las sales en el paisaje montañoso.</p> <p>5. Uso de riego por goteo o aspersión controlada en cultivos, evitando excesos de agua que movilicen sales hacia la superficie.</p>	<p>- Reducción de la salinización y mejora del intercambio de agua.</p> <p>- Estabilizar la CE y la acumulación superficial de las sales solubles.</p> <p>- Un aumento en la infiltración y una disminución gradual de la CE en suelos con tendencia salina.</p> <p>-Aumentar la conciencia sobre los beneficios del uso eficiente del agua y los efectos sobre la salinidad del suelo.</p>	<p>-Se documentarán los resultados de análisis de CE en laboratorio.</p> <p>- Visitas de campo.</p> <p>-Fichas de riego aplicado.</p> <p>-Registros fotográficos de las parcelas.</p> <p>-Informes técnicos</p>
-----------	--	--	---	---

Parámetro	Estrategia	Actividades	Resultados esperados	Medio de verificación
-----------	------------	-------------	----------------------	-----------------------

Textura	Conservación de la estructura del suelo y la mejora de su agregación física mediante intervenciones apropiadas al contexto local.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aplicación de mantillos naturales, como hojarasca o paja de páramo, para prevenir la acción destructiva de las gotas de lluvia sobre los agregados del suelo.</li> <li>2. Establecimiento de especies de raíces profundas, por ejemplo, <i>Arachis pintoii</i> o <i>Chusquea sp.</i>, para mejorar la porosidad del suelo y acelerar la formación de macroagregados.</li> <li>3. Conservación de la estructura del suelo mediante la agricultura sin labranza o la siembra directa.</li> <li>4. Uso de fertilizantes orgánicos para ayudar a que esas partículas se unan y evitar que se compacten.</li> <li>5. Plantación de cultivos y/o coberturas vegetales (<i>gramíneas</i> o <i>leguminosas rastreras</i>) en áreas degradadas.</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento de la porosidad, capacidad de humedad y equilibrio en la textura aparente.</li> <li>- Conservación de agregados y preservación estructural.</li> <li>- Proteger las partículas ligeras y mejorar la estabilidad de la estructura.</li> <li>- Reducir el impacto de la lluvia y controlar la compactación de la superficie.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Observaciones In situ</li> <li>- Registros fotográficos.</li> <li>- Análisis físico del suelo y reportes de aplicación.</li> <li>- Registros de manejo</li> </ul>
---------	---	---	--	--

Nota: Presentación de las estrategias de restauración que se pueden aplicar en el cerro Putzalahua. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se detalla la frecuencia recomendada para cada análisis de los parámetros fisicoquímicos en laboratorio en función a la Tabla 38.

Se recomienda analizar el pH una vez al año, dado que tiende a estabilizarse, aunque puede presentar variaciones estacionales vinculadas a la vegetación y el manejo (Mataix & Guerrero, 2020). Para la materia orgánica, cuya recuperación es más lenta, un análisis bianual resulta adecuado para detectar incrementos superiores al % (Pereira et al., 2023).

Respecto al nitrógeno y fósforo, se propone mantener una frecuencia anual, ya que aún podrían producirse pérdidas por lixiviación o escasa retención (Gómez et al., 2019). La conductividad eléctrica, en cambio, requiere un seguimiento semestral durante al menos dos años más, con el fin de descartar salinidad residual (USDA, 2021).

En función de los parámetros seleccionados para el seguimiento, se propuso realizar los análisis de laboratorio en el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), institución que cuenta con acreditación nacional, experiencia técnica y costos accesibles para estudios aplicados en contextos ambientales.

Debido al tiempo transcurrido desde el incendio en el Cerro Putzalahua, se sugirió mantener la frecuencia de evaluación de una vez al año durante los próximos tres años; además, deberíamos priorizar las estaciones de transición (finales del invierno o principios de la estación seca), ya que esta temporalidad es más propicia para cuantificar los procesos de recuperación del suelo (FAO, 2022). Esta vigilancia permitirá validar si las estrategias implementadas son efectivas y reforzar la base para la realización de la restauración ecológica.

## **14. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **14.1. Conclusiones**

- Respecto al muestreo sistemático de suelos, se concluyó que la estrategia aplicada permitió obtener muestras representativas en áreas bajo el efecto o no de incendios forestales, cumpliendo con las disposiciones del Acuerdo Ministerial 097-A, aspecto clave para asegurar la validez del análisis comparativo en función de la complejidad del ecosistema de páramo y las dificultades logísticas en el área estudiada. Además, la combinación de métodos de cuarteo, zigzag y radial ha demostrado ser un enfoque metodológico efectivo para adaptarse a los atributos topográficos y ecológicos del cerro

Putzalahua. Se evidenciaron diferencias en pH, materia orgánica, calcio y potasio fueron evidentes en áreas influenciadas y no influenciadas, con cambios en la estructura de la matriz del suelo después del incendio. Se detectó una acidificación superficial sostenida en las zonas afectadas (pH promedio 6.25) en contraste con valores neutros o ligeramente alcalinos en superficies no quemadas, lo que sugiere un agotamiento de bases y la presencia persistente de compuestos ácidos en el perfil superficial. Esta tendencia, junto al descenso parcial de la materia orgánica superficial (promedio de 1.21 %), confirma que el efecto del incendio persiste aún después de cinco años limitando la capacidad del ecosistema para recuperarse de forma natural. En conjunto, los datos evidenciaron un estado de alteración química del suelo post-incendio, cuyas consecuencias ambientales se reflejan en una menor capacidad del suelo para retener nutrientes y sostener los procesos biológicos necesarios para su funcionamiento.

- Comparando las propiedades físicoquímicas del suelo bajo ANOVA, se concluye que tuvo un efecto significativo en la disponibilidad de calcio (Ca) y potasio (K) para el suelo, donde se encontraron altas concentraciones en la superficie, como se observa en el bosque incendiado. Esta mejora, que está asociada con la liberación térmica de cenizas y minerales, representa un pulso químico a corto plazo que no siempre beneficia la recuperación de la vegetación, ya que se une a la acidificación del suelo y la disminución de materia orgánica, lo que provoca deterioro del equilibrio iónico. Por otro lado, el hecho de que la textura media del suelo y las concentraciones de Na no difirieran significativamente, las propiedades físicas del suelo se consideran relativamente constantes, incluso si los niveles de Na en el suelo son de hecho riesgos potenciales de salinización superficial. En resumen, los efectos sugieren que el fuego cambió selectivamente la composición química del suelo para inhibir la capacidad del suelo de retener nutrientes y alterar los procesos naturales de reciclaje, impidiendo así la restauración ecológica del páramo.
- Las medidas de restauración propuestas demuestran que la recuperación del suelo no solo es una cuestión de restaurar la materia orgánica perdida, sino también de tratar el desequilibrio en cationes intercambiables y la acidificación restante. Sin embargo, una tendencia hacia la acidificación también enfatiza la necesidad de regular el pH en el campo mediante la implementación de una cobertura vegetal y el ajuste de correctivos básicos. Además, el diagnóstico físico del suelo, que mostró que la erosión superficial es una amenaza potencialmente importante, frustró mis esfuerzos. Por lo tanto, las

estrategias se centran aquí en mejorar mientras se fortalece la cobertura del suelo, y de ahí la inclusión de materia orgánica estabilizada. Lo que se prevé con esta propuesta es no solo mitigar las modificaciones reportadas, sino también recuperar el funcionamiento del suelo, una base de la resiliencia ambiental en el ecosistema en Cerro Putzalagua.

#### **14.2. Recomendaciones**

- Se recomienda al Ministerio del Ambiente Agua y transición Ecológica implementar un programa de monitoreo continuo de los parámetros fisicoquímicos del suelo como pH, contenido de materia orgánica y concentración de nutrientes especialmente en las zonas de páramo afectadas por incendios forestales. Este seguimiento permitiría detectar de manera oportuna procesos de degradación del suelo y aplicar las medidas correctivas necesarias, en concordancia con la normativa ambiental vigente a nivel nacional.
- Se sugiere a los GADS provinciales y municipales deben introducir dentro del alcance de sus planes de gestión ambiental programas de políticas relacionados con proyectos específicos enfocados en la restauración del suelo, mediante prácticas que incluyan la aplicación de compost estabilizado, revegetación con especies nativas y ajuste del pH del suelo. Estas intervenciones serían relevantes para lugares clasificados como alterados después de incendios forestales, para restaurar la funcionalidad del suelo y mejorar la resiliencia del ecosistema.
- Por último, se sugiere que las organizaciones locales, privadas y comunitarias involucradas en la conservación ambiental faciliten programas de capacitación específicos dirigidos a las comunidades locales, con el objetivo de restaurar el uso del suelo y cómo cuidarlo y mantenerlo adecuadamente después de los incendios. Estas capacitaciones deben incluir prácticas de retención de humedad, control de erosión y recuperación de material orgánico, como parte de estrategias diseñadas para mejorar la resiliencia de los ecosistemas de páramo.

#### **15. BIBLIOGRAFÍAS**

Agbeshie, A. A., Abugre, S., Atta-Darkwa, T., & Awuah, R. (2022a). A review of the effects of forest fire on soil properties. *Journal of Forestry Research*, 33(5), 1419-1441. <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01475-4>

- Agbeshie, A. A., Abugre, S., Atta-Darkwa, T., & Awuah, R. (2022b, octubre). A review of the effects of forest fire on soil properties. *Journal of Forestry Research*, 33(5), 1419-1441. <https://link.springer.com/10.1007/s11676-022-01475-4>
- Aguilar, S. (2019). *Validación del método de calcinación en la determinación del contenido de la materia orgánica del suelo* [Universidad La Molina]. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/e66fd425-f325-4d2f-b295-85c7620b638a>
- Andrade, R. (2024). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del GAD Parroquial Rural de Belisario Quevedo 2023–2027*. Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial de Belisario Quevedo.
- Arunrat, N., Kongsurakan, P., Solomon, L. W., & Sereenonchai, S. (2024, septiembre 23). Fire Impacts on Soil Properties and Implications for Sustainability in Rotational Shifting Cultivation: A Review. *Agriculture*, 14(9), 1660. <https://www.mdpi.com/20770472/14/9/1660>
- Betancourt, J., Castillo, W., Corral, L., & Portilla, A. (2020). Índices de peligro y simulación de incendios forestales en ambiente SIG para Baja California. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 25(88), Article 88.
- Caiza, A., Castillo, S., & Cervantes, K. (2022). *GRANULOMETRÍA POR HIDRÓMETRO*. <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-central-del-ecuador/mecanica-desuelos/granulometria-por-hidrometro/46587832>
- Carrión-Paladines, V., Fries, A., Hinojosa, M. B., Oña, A., Álvarez, L. J., Benítez, Á., Rodríguez, F. L., & García-Ruiz, R. (2023, noviembre 22). Effects of Low-Severity Fire on Soil Physico-Chemical Properties in an Andean Páramo in Southern Ecuador. *Fire*, 6(12), 447. <https://www.mdpi.com/2571-6255/6/12/447>
- Castillo, M., Pedernera, P., & Peña, E. (2003). Incendios forestales y medio ambiente: Una síntesis global. *REVISTA AMBIENTE Y DESARROLLO*, XIX(3 y 4).
- Certini, G. (2019). Soil changes induced by forest fires. *Geomorphology*, 333, 1-9.
- Cheng, J. (2021). A Review of Wildfire Effects on Soils, Hydrologic Processes and Water. 2021. Cheng, X. (2021). A review of wildfire effects on soils, hydrologic processes and water. *UBC*. <https://doi.org/10.XXX>

- Cheng, Z., Wu, S., Wei, D., Pan, H., & Yang, L. (2024). Current Status of Research on Wildland Fire Impacts on Soil Environment and Soil Organisms and Hotspots Visualization Analysis. *Fire*, 7(1), 163.
- Cisneros, C., Calahorrano, J., & Manzano, M. (2024). Análisis espacial y temporal de incendios forestales en el Ecuador utilizando datos de sensores remotos. *Colombia Forestal*, 27(1). <https://doi.org/10.14483/2256201x.20111>
- Cisneros Vaca, C., Calahorrano, J., & Manzano, M. (2024). Análisis espacial y temporal de incendios forestales en el Ecuador utilizando datos de sensores remotos. *Colombia forestal*, 27(1), e20111. <https://doi.org/10.14483/2256201X.20111>
- Clavijo, P., Portilla, J., Chínque, F., & Iza, A. (2025). SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL CON BASE EN INDICADORES PARA EL PÁRAMO CHILCATINGO-YACUBAMBA, CANTÓN SALCEDO, PROVINCIA DE COTOPAXI, ECUADOR. *Journal of Law and Sustainable Development*, 13(2), e4283.
- Coaguila, L., Mataix-Solera, J., Nina, S., García-Carmona, M., & Salazar, E. T. (2025a). Soil Degradation Evidence Following a Wildfire in Arequipa's Andean Region, Peru. *Spanish Journal of Soil Science*, 15, 13983. <https://doi.org/10.3389/sjss.2025.13983>
- Coaguila, L., Mataix-Solera, J., Nina, S., García-Carmona, M., & Salazar, E. T. (2025b, enero 20). Soil Degradation Evidence Following a Wildfire in Arequipa's Andean Region, Peru. *Spanish Journal of Soil Science*, 15. <https://www.frontierspartnerships.org/articles/10.3389/sjss.2025.13983/full>
- Código Orgánico del Ambiente. (2017). *Código Orgánico del Ambiente*. <https://www.ambiente.gob.ec/codigo-organico-del-ambiente-coa/>
- Comunidad de Práctica de Suelos, para A. L. y el C. (2023). *Impacto de los incendios forestales sobre el suelo: Documento de referencia*. FAO. <https://www.fao.org/3/cb5925es/cb5925es.pdf>
- Constitución de la República del Ecuador 2008. (2008). *Universidad de las Artes*. <https://www.uartes.edu.ec/sitio/download/constitucion-de-la-republica-del-ecuador-2008/>
- Cordones, K., & Jiménez, A. (2022). *VALORACIÓN AMBIENTAL DEL CERRO PUTZALAHUA UBICADO EN LA PARROQUIA BELISARIO QUEVEDO, CANTÓN LATACUNGA. PROPUESTA DE CONSERVACIÓN, 2022* [Proyecto de Investigación,

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI].

<http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/10145>

Dagnino, J. (2014). ANÁLISIS DE VARIANZA. *Revista Chilena de Anestesia*, 43(4), 306-310.

<https://doi.org/10.25237/revchilanest.v43i04.07>

Doerr, S. H., & Santín, C. (2016). Global trends in wildfire and its impacts: Perceptions versus realities in a changing world. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 371(1696), 20150345. <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0345>

ESLAW. (2023). *Módulo 4: Conceptos básicos para un muestreo de suelos*. Environmental Law Alliance Worldwide. <https://elaw.org/wp-content/uploads/2023/01/Guia-para-larecoleccion-de-muestras-ambientales-Modulo-4-Espanol.pdf>

Estrada, L., Lozano, J., & Trejo, D. (2022). Susceptibilidad a incendios en el Campo Forestal Experimental Las Cruces, Texcoco, México: Una priorización basada en el enfoque multicriterio. *Sociedad y Ambiente*, 25, Article 25. <https://doi.org/10.31840/sya.vi25.2484>

FAO. (2022). *Guidelines for soil organic matter stock monitoring and analysis*. *FAO Soils Portal*.

Farfán, M., Flamenco, A., & Rodríguez, C. (2020). Cartografía de la probabilidad de ocurrencia a incendios forestales para el estado de Guanajuato: Una aproximación antrópica de sus fuentes de ignición. *Acta universitaria*, 30. <https://doi.org/10.15174/au.2020.2953>

Field, A. (2020). *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics*. *SAGE Publications*, 5.

Flores, J. (2021). Antecedentes y perspectivas de la investigación en incendios forestales en el INIFAP. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 12(SPE1), 91-119. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12iespecial-1.981>

Frontiers Editorial Office. (2023). Effects of wildfire on soils: Field studies and modelling on induced changes. *Frontiers in Earth Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1307569>

Galván, L., & Magaña, V. (2020). Incendios forestales en México: Un enfoque para estimar las probabilidades de incendio. *International Journal of Wildland Fire*, 29(9), 753-763. <https://doi.org/10.1071/WF19057>

García, J., González, D., & López, M. (2022). Post-fire nutrient dynamics in volcanic soils. *Catena*, 213, 106234.

- García, V. J., Márquez, C. O., Rodríguez, M. V., Orozco, J. J., Aguilar, C. D., & Ríos, A. C. (2020). Páramo Ecosystems in Ecuador's Southern Region: Conservation State and Restoration. *Agronomy*, *10*(12), 1922. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121922>
- Garrido, C. (2023). *Evaluación de la calidad química, física y microbiológica de suelos de uso agropecuario afectados por incendios forestales* [Doctorado, Universidad de Concepción.]. <https://repositorio.udec.cl/handle/11594/11656>
- Gómez, A., Moreno, J., & Pérez, F. (2019). Soil fertility dynamics after fire in Mediterranean ecosystems: A long-term perspective. *Journal of Environmental Management*, *248*, 109302.
- Gómez Gil, C. (2018). Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): Una revisión crítica. *Dialnet*, *140*, 107-118. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6312616>
- González, A., & Ortiz, C. (2022). Superficie forestal afectada por incendios en México: Apuntes iniciales hacia un modelo de manejo preventivo. *Revista de Ciencias Ambientales*, *56*(1), 1-27. <https://doi.org/10.15359/rca.56/1.1>
- González, H. M., & Coronado, J. G. (2007). *El método del hidrómetro: Base teórica para su empleo en la determinación de la distribución del tamaño de partículas de suelo*. *16*(3).
- González, P. (2017). *Impacto de los incendios forestales en suelos, agua y vegetación*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Departamento de Estudios, Extensión y Publicaciones. <https://www.bcn.cl>
- Heredia, R., Villamil, D., & Banda, M. (2021). *Estudio de interpretación patrimonial del Cerro Putzalahua Heritage interpretation study of Cerro Putzalahua*. *6*(7). *Iniapsc635.65E17p12.pdf*. (s. f.).
- Instituto Nacional de Patrimonio Cultural. (2015). *Guía Metodológica para el Paisaje Cultural Ecuatoriano*. Instituto Nacional de Patrimonio Cultural. <https://www.patrimoniocultural.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/ojo-Guia-paisajecultural.pdf>
- Jiménez, P., Rodríguez, G., & Ruiz, P. (2021). Short-term recovery of organic matter in Mediterranean soils after wildfire. *Geoderma*, *404*, 115344.
- Kassambara, A. (2020). Practical Guide to ANOVA: Statistical Analysis. *STHDA*. <https://www.sthda.com/>
- Lombao, A., Vega, J., Fontúrbel, M., & Fernández, C. (2023). Fire-induced changes in soil pH and nutrient availability. *Science of The Total Environment*, *867*, 161554.

- MAATE. (2015). *Acuerdo Ministerial No. 097: Norma técnica de diseño de sistemas de monitoreo ambiental*. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/Acuerdo-097.pdf>
- Marfella, L., Mairota, P., Marzaioli, R., Glanville, H., Pazienza, G., & Rutigliano, F. (2024). Long term impact of wildfire on soil physical, chemical and biological properties within a pine forest. *European Journal of Forest Research*, 143(5), 1379-1399.
- Mataix, J., & Artemi, C. (2009). Los efectos de los incendios forestales en los suelos. Síntesis y conclusiones. Nuevos retos en la investigación y en la gestión. *researchgate*.
- Mataix, J., & Guerrero, C. (2020). Effects of fire on soil properties: A comprehensive review of volcanic terrains. *Soil Science Society of America Journal*, 84(4), 1140-1155.
- Mendoza, R., & Espinoza, A. (2017). *Guía Técnica para Muestreo de Suelos* (1.<sup>a</sup> ed.). Universidad Nacional Agraria y Catholic Relief Services (CRS). <https://repositorio.una.edu.ni/3613/1/P33M539.pdf>
- Merino, C., Jofré, I., Stock, S., Nájera, F., Matus, F., Kuzyakov, Y., Aburto, F., Dörner, J., Rubilar, R., & Dippold, M. A. (2025). Soil Recovery After Fire: Texture and Porosity Shape Microbial Functions. 2025, 40. <https://ssrn.com/abstract=5290330>
- Minervini, M. G., Morrás, H. J. M., & Taboada, M. Á. (2018). Efectos del fuego en la matriz del suelo. Consecuencias sobre las propiedades físicas y mineralógicas. *Ecología Austral*, 28(1), 012-027. <https://doi.org/10.25260/EA.18.28.1.0.127>
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (2019). *Plan Nacional de Restauración Forestal 2019-2030*. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/11/PLAN-NACIONAL-DE-RESTAURACION-FORESTAL-2019-2030.pdf>
- Ministerio del Ambiente Perú. (2018). *GUÍA PARA EL MUESTREO DE SUELOS*. Biblioteca Nacional del Perú. [https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/04/GUIA-MUESTREO-SUELO\\_MINAM1.pdf](https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/04/GUIA-MUESTREO-SUELO_MINAM1.pdf)
- Mora, J. E. G. (2020). Incendios Forestales: Causas e impactos. *El Antoniano*, 6(1), Article 1. <https://doi.org/10.51343/anto.v135i1.866>
- Moreno Ávila, A. S., Ágreda Oña, J. L., & Parra Zurita, J. C. (2025). Revisión sistemática de métodos colorimétricos en la detección de arsénico en suelos: Aplicaciones, limitaciones y perspectivas. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(2), 1160-1188. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v9i2.16963](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i2.16963)

- Moreno, J., & Azcárate, J. (2022). Evaluation of the USDA soil texture triangle through Atterberg limits and an alternative classification system. *Catena*, *213*, 106166.
- Narváez-Ortiz, W. A., Morales-Díaz, A. B., Benavides-Mendoza, A., & Reyes- Valdés, M. H. (2018). Dinámica de la composición de la solución del suelo en cultivos del occidente de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *12*, 2383-2397. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i12.769>
- Navidi, M., Lucas, M. E., Plaza, P. A., Carra, B. G., Parhizkar, M., & Zema, D. A. (2022, octubre 1). Mid-Term Changes in Soil Properties after Wildfire, Straw Mulching and Salvage Logging in *Pinus halepensis* Mill. Forests. *Fire*, *5*(5), 158. <https://www.mdpi.com/2571-6255/5/5/158>
- Neger, C., Manzo, L., & Galicia, L. (2022). La investigación geográfica de los incendios forestales en México: Una perspectiva bibliométrica y territorial. *Investigaciones geográficas*, *108*. <https://doi.org/10.14350/rig.60488>
- Norma Técnica para Evaluación y Valoración de Daños por Incendios Forestales. (2015). *Norma Técnica para Evaluación y Valoración de Daños por Incendios Forestales*. <https://www.ambiente.gob.ec/mae-socializa-acuerdo-ministerial-098-con-el-sector-deneumaticos/>
- Oliva, M., Maffia, A., Marra, F., Canino, F., Battaglia, S., Mallamaci, C., & Muscolo, A. (2025). The complex impacts of fire on soil ecosystems: Insights from the 2021 Aspromonte National Park wildfire. *Journal of Forestry Research*, *36*(1). <https://doi.org/10.1007/s11676-025-01864-5>
- Ortiz, C., & González, A. (2022). Superficie forestal afectada por incendios en México: Apuntes iniciales hacia un modelo de manejo preventivo. *Revista de Ciencias Ambientales*, *56*(1), 1-27. <https://doi.org/10.15359/rca.56/1.1>
- Pausas, J. (2020). *Incendios forestales*. Los Libros De La Catarata.
- Pereira, P., Cerdá, A., Mataix, J., & Úbeda, X. (2023). Post-fire soil resilience and recovery trajectories. *Environmental Research*, *233*, 116412.

- Pérez, C. A. P., Blanco, J. L., & Correa, G. V. (2009). Influencia del relieve en las propiedades de un suelo afectado por incendio en el volcán El Pelado, Centro de México. *UNAM*, 69, 7-20.
- Pérez, D., Ruiz, M., & Castillo, A. (2021). Aplicación de transformaciones logarítmicas para asegurar la normalidad en datos edáficos. *Journal of Soil Methodologies*, 8(1), 45-58.
- Pina, N. C. A., & de Armas, J. M. (2015). *La aptitud de los suelos para la producción de caña de azúcar. Parte I. Calibración en condiciones experimentales y de producción.*
- Plan Nacional de Restauración Forestal. (2019). *Plan Nacional de Restauración Forestal.* <https://www.fao.org/faolex/results/details/es/c/LEX-FAOC197256/>
- Porta Casanellas, J. (2019). *Edafología: Uso y protección de suelos.* Ediciones Mundi-Prensa.
- Puentes, Y., Menjivar, J., & Aranzazu, F. (2014). EFICIENCIAS EN EL USO DE NITRÓGENO, FÓSFORO Y POTASIO EN CLONES DE CACAO (*Theobroma cacao* L.). *Bioagro*, 26.
- Ramírez, D., Andrade, D., & Sepúlveda, D. (2018). ANÁLISIS COMPARATIVO DEL ESTUDIO FÍSICOQUÍMICO DE SUELOS CON PLANTACIÓN DE *Theobroma Cacao* L. EN ZONAS ESPECÍFICAS DE LOS MUNICIPIOS DE BELÉN DE UMBRÍA- RISARALDA Y BELALCÁZAR-CALDAS. *Suelos Ecuatorianos*, 48(1 y 2), 57-63.
- Ramos, M., García, H., & França, A. (2021). Ocurrencia de incendios forestales en el cantón Santa Ana, provincia de Manabí, Ecuador (2012-2018). *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 9(3), 322-339.
- Ramos-Rodríguez, M. P., Tigua-Parrales, M. J., Baque-Ramos, J. B., Manrique-Toala, T. O., & Castro-Landín, A. L. (2024). Efectos del fuego sobre características físico-químicas y nutricionales del suelo en tierras de vocación forestal. *Madera y Bosques*, 30(1), e3012509. <https://doi.org/10.21829/myb.2024.3012509>
- Reglamento al Código Orgánico del Ambiente. (2019). *Reglamento al Código Orgánico del Ambiente.* <https://www.gob.ec/regulaciones/reglamento-al-codigo-organico-ambiente>
- Reyes, F., & Balcázar, C. (2021). Factores que inciden en la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en Ecuador. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 11(1), 50-60. <https://doi.org/10.29166/revfig.v11i1.2634>
- Rodríguez, A., Martínez, L., & Jordán, A. (2020). Potassium and calcium variation after wildfires in forest soils. *Forest Ecology and Management*, 477, 118462.

- Rodríguez, M., González, S., & García, M. (2024). Fire-induced changes in Andosols of volcanic regions: Soil recovery five years after wildfire. *Catena*, 228, 107093.
- Rodríguez, M., Sánchez, J., & Benito, E. (2022). Post-fire soil stability and ecosystem recovery: A review of global patterns. *Earth-Science Reviews*, 226, 103933.
- Roman, M., Zubieta, R., Ccanchi, Y., Martínez, A., Paucar, Y., Alvarez, S., Loayza, J., & Ayala, F. (2024, julio 21). Seasonal Effects of Wildfires on the Physical and Chemical Properties of Soil in Andean Grassland Ecosystems in Cusco, Peru: Pending Challenges. *Fire*, 7(7), 259. <https://www.mdpi.com/2571-6255/7/7/259>
- Ruiz, J., Moreno, J., & Jiménez, E. (2021). Cambios en las propiedades químicas del suelo a mediano plazo después de incendios forestales. *International Journal of Wildland Fire*, 30(3), 174-186.
- Rustowska, B. (2022). Long term wildfire effect on nutrient distribution in silver birch (*Betula pendula* Roth) biomass. *Soil Science Annual*, 73(2). <https://doi.org/10.37501/soilsa/149943>
- Silva, A., & Pinto, R. (2022). Soil sodium behavior in post-burn environments. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(6), 462.
- Smith, J., Brown, L., & Nguyen, T. (2024). The complex impacts of fire on soil ecosystems. *Journal of Forestry Research*, 33, 1419-1441.
- Soto, J., Álvarez, M., Vázquez, J., & Ricardo, G. (2024, enero 20). Evaluación físico, químico y microbiológico del suelo en cultivos de *Musa paradisiaca* Cavendish y *Elaeis guineensis* Jac. Provincia de los Ríos. *Revista Alfa*, 8(22), 110-125. <https://www.revistaalfa.org/index.php/revistaalfa/article/view/335>
- Souza, P., Saiz, G., García, R. A., Pauchard, A., Ferreira, A., & Merino, A. (2022). Post-fire ecological restoration in Latin American forest ecosystems: Insights and lessons from the last two decades. *Forest Ecology and Management*, 509, 120083. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120083>
- Tillaguango, J., Muñoz, L., Muñoz, J., & Aguirre, Z. (2023, abril 25). Characterization of a *Pteridium arachnoideum* (Kaulf.) Maxon population and the vegetation associated with the anthropic paramo in Southern Ecuador. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 20(47), 16-25. <http://dx.doi.org/10.18845/rfmk.v20i47.6820>
- Torres, J. (2020). Índice para la estimación de la incidencia de incendios forestales en grandes zonas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 26(3), 433-449.

- <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.11.082>
- United States Environmental Protection Agency. (2023). Incremental Sampling Methodology. *United States Environmental Protection Agency*. <https://sbr-1.itrcweb.org/sampling/>
- USDA. (2021). *Soil Electrical Conductivity: Natural Resources Conservation Service guidance*.
- Vásquez, H. F. (2022). *Validación de métodos analíticos para la determinación de pH, conductividad y la capacidad de intercambio catiónico total por el método de acetato de amonio en suelos*. [Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico, Universidad de Cuenca]. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/items/a0cd2a14-3f2e-458d-bd73-832ac0e58133>
- Villar, B., Pérez, S., Rodríguez, D., & Pérez, P. (2022). Análisis espacio temporal de la ocurrencia de incendios forestales en el estado mexicano de Oaxaca. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 13(74), 120-144. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i74.1274>
- Vizuete, N. (2022). *Evaluación de dos métodos para la determinación de fósforo asimilable en suelo de tipo andisol* [Proyecto de Investigación, ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO]. <https://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/17613>
- Yang, K., Yan, X., Xu, J., Jiang, L., & Wu, W. (2021). Sorption of organic compounds by pyrolyzed humic acids. *Science of The Total Environment*, 781, 146646. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146646>
- Ye, C., Zheng, G., Tao, Y., Xu, Y., Chu, G., Xu, C., Chen, S., Liu, Y., Zhang, X., & Wang, D. (2024). Effect of Soil Texture on Soil Nutrient Status and Rice Nutrient Absorption in Paddy Soils. *Agronomy*, 14(6), 1339. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061339>
- Ysla, M., Ponce, C., & Zacarias, N. (2023). Modelado de zonas de riesgo para incendios forestales en zonas altoandinas del Perú. *2023 the 7th International Conference on Energy and Environmental Science*, 65-78. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-32068-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-32068-2_6)
- Zamora, M., Azanza, J., & Bezanilla, A. (2022). Impacto del cambio climático en la generación de incendios forestales en Las Tunas. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 10(2), 150-168.

