

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Efecto de la quema en las propiedades fisicoquímicas
de un suelo agrícola en el distrito de
Sincos, Jauja, 2018**

Lyz Deyssy Huaman Cardenas

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Ambiental

Huancayo, 2021

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

AGRADECIMIENTOS

A todas aquellas personas que con su ayuda y colaboración me han acompañado en el día a día y me han apoyado en este proceso de investigación.

En primer lugar, agradecer al Dr. Andrés Alberto Azabache Leyton, por guiarme con entusiasmo e infinita paciencia durante la elaboración y desarrollo de la tesis. A mis jurados revisores Ing. Janet Gaby Inga Guillen, Ing. Jacinto Venancio Arroyo Aliaga y al Ing. Steve Dann Camargo Hinojosa quienes me brindaron las pautas para la mejora de la investigación.

A mis padres y hermano Piero que me han acompañado en este largo camino.

A mis amigas Karina, Pamela y Madeleyne por su apoyo incondicional contribuyendo al desarrollo del presente trabajo de investigación.

DEDICATORIA

A mis padres, mi hermano Piero y todas las personas que contribuyeron para hacer posible este trabajo de investigación.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos.....	ii
Dedicatoria	iii
Índice general.....	iv
Índice de tablas	vii
Índice de figuras	xi
Resumen.....	xiii
Abstract.....	xiv
Introducción.....	xv
CAPÍTULO I.....	17
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	17
1.1 Planteamiento y formulación del problema.....	17
1.1.1 Planteamiento del problema	17
1.1.2. Formulación del problema	19
1.1.2.1. Problema general	19
1.1.2.2. Problemas específicos	19
1.2. Objetivos	19
1.2.1. General	19
1.2.2. Específicos	19
1.3. Justificación e importancia	19
1.3.1. Justificación	19
1.3.2. Importancia de la investigación.....	20
1.4. Hipótesis.....	21
1.4.1. General	21
1.4.2. Específicas	21
1.5. Descripción de variables	21
1.5.1. Variable independiente: Temperatura (°C)	21
1.5.2. Variable dependiente	21
CAPÍTULO II.....	23
MARCO TEÓRICO	23
2.1. Antecedentes del problema	23
2.2. Bases teóricas.....	31

2.2.1. La temperatura.....	31
2.2.2. El fuego.....	31
2.2.2.1. Intensidad del fuego	31
2.2.2.2. Severidad del fuego.....	33
2.2.2.3. Severidad de la quema.....	33
2.2.2.4. Respuesta del ecosistema.....	34
2.2.2.5. Umbrales de temperatura de las propiedades del suelo	35
2.2.3. Efecto de la temperatura sobre las propiedades del suelo	36
2.2.3.1. Textura del suelo	37
2.2.3.2. pH y conductividad eléctrica	37
2.2.3.3. Materia orgánica.....	38
2.2.3.4. Capacidad de intercambio catiónico	40
2.2.3.5. Cationes cambiables	41
2.2.3.6. Fósforo	42
2.3. Definición de términos básicos.....	43
CAPÍTULO III.....	46
METODOLOGÍA	46
3.1. Método y alcance de la investigación	46
3.1.1. Método de la investigación	46
3.1.1.1. Método general o teórico de la investigación.....	46
3.1.1.2. Método específico de la investigación	47
3.1.2. Alcances de la investigación.....	48
3.1.2.1. Tipo de investigación	48
3.1.2.2. Nivel de investigación	49
3.2. Tratamientos en estudio.....	49
3.3. Diseño de investigación.....	49
3.4. Población y muestra	50
3.4.1. Población	50
3.4.2. Muestra.....	51
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	52
3.5.1. Técnicas	52
3.5.2. Instrumentos utilizados en la recolección de datos.....	52
3.6. Técnicas de procesamiento de datos	52
CAPÍTULO IV.....	53

RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
4.1 Resultados del tratamiento y análisis de la información	53
4.1.1. Propiedades físicas del suelo	53
4.1.1.1. Contenido de arena (%).....	53
4.1.1.2. Contenido de limo (%)	55
4.1.1.3. Contenido de arcilla (%)	57
4.1.2. Propiedades químicas del suelo	59
4.1.2.1. pH.....	59
4.1.2.2 Conductividad eléctrica (CE) del suelo	61
4.1.2.3. Materia orgánica del suelo (MOS)	63
4.1.2.4. Fósforo disponible del suelo (PDS)	65
4.1.2.5. Potasio disponible del suelo (KDS)	67
4.1.2.6. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) del suelo	69
4.1.2.7. Calcio cambiante (Cax) del suelo	71
4.1.2.8. Magnesio cambiante (Mgx) del suelo	73
4.1.2.9. Potasio cambiante (Kx) del suelo	75
4.1.2.10. Sodio cambiante (Nax) del suelo	77
4.1.2.11. Relación Ca: Mg	79
4.1.2.12. Relación K: Mg	81
4.2. Discusión.....	83
4.2.1. Propiedades físicas.....	83
4.2.2. Propiedades químicas	85
Conclusiones.....	91
Recomendaciones.....	93
Lista de referencias	94
Anexos	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables.....	22
Tabla 2. Análisis fisicoquímico del suelo	48
Tabla 3. Tratamientos en estudio	49
Tabla 4. Resultados del análisis de arena al final del experimento	54
Tabla 5. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el contenido de arena (%) del suelo.....	54
Tabla 6. Análisis de varianza en el contenido de arena del suelo sometido a diferentes temperaturas.....	54
Tabla 7. Prueba de Duncan para contenido de arena del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas	54
Tabla 8. Resultados del análisis de limo al final del experimento. Suelo de Sincos.....	56
Tabla 9. Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro - Wilks para el contenido de limo	56
Tabla 10. Prueba de Kruskal-Wallis para contenido de limo del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas	56
Tabla 11. Resultados del análisis de arcilla al final del experimento. Suelo de Sincos.....	58
Tabla 12. Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro - Wilks para el contenido de arcilla del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas	58
Tabla 13. Análisis de varianza del contenido de arcilla del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas	58
Tabla 14. Prueba de Duncan para contenido de arcilla del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas	58
Tabla 15. Resultados del análisis de pH al final del experimento. Suelo de Sincos.....	60
Tabla 16. Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro Wilks para pH del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas	60
Tabla 17. Prueba de Kruskal-Wallis para pH del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas.....	60

Tabla 18. Resultados del análisis de la CE al final del experimento. Suelo de Sincos.....	62
Tabla 19. Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro – Wilks para la CE del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas	62
Tabla 20. Prueba de Kruskal-Wallis para la CE del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas.....	62
Tabla 21. Resultados del análisis de la MOS al final del experimento. Suelo de Sincos.....	64
Tabla 22. Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro - Wilks para la MOS del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas	64
Tabla 23. Prueba de Kruskal-Wallis para la MOS del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas.....	64
Tabla 24. Resultados del análisis del PDS al final del experimento. Suelo de Sincos.....	66
Tabla 25. Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro - Wilks para el PDS del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas	66
Tabla 26. Prueba de Kruskal-Wallis para el PDS de Sincos sometido a diferentes temperaturas.....	66
Tabla 27. Resultados del análisis del KDS al final del experimento. Suelo de Sincos.....	68
Tabla 28. Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro - Wilks para el KDS de Sincos sometido a diferentes temperaturas	68
Tabla 29. Análisis de varianza del contenido de KDS del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas	68
Tabla 30. Prueba de Duncan para el KDS de Sincos sometido a diferentes temperaturas.	68
Tabla 31. Resultados del análisis de la CIC al final del experimento. Suelo de Sincos.....	70
Tabla 32. Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro Wilks para la CIC del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas	70
Tabla 33. Análisis de varianza del contenido de la CIC del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas	70
Tabla 34. Prueba de Duncan para la CIC del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas.....	71

Tabla 35. Resultados del análisis del Cax al final del experimento. Suelo de Sincos.....	72
Tabla 36. Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro Wilks para el Cax del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas	72
Tabla 37. Análisis de varianza del contenido de Cax del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas	72
Tabla 38. Prueba de Duncan para el Cax del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas.....	73
Tabla 39. Resultados del análisis del Mgx al final del experimento. Suelo de Sincos.....	74
Tabla 40. Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro - Wilks para el Mgx del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas.....	74
Tabla 41. Análisis de varianza del contenido de Mgx del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas	74
Tabla 42. Prueba de Duncan para el Mgx del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas.....	75
Tabla 43. Resultados del análisis del Kx al final del experimento. Suelo de Sincos.....	76
Tabla 44. Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro Wilks para el Kx del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas	76
Tabla 45. Análisis de varianza del contenido de Kx del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas	76
Tabla 46. Prueba de Duncan para el Kx del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas.....	77
Tabla 47. Resultados del análisis del Nax al final del experimento. Suelo de Sincos.....	78
Tabla 48. Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro Wilks para el Nax del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas	78
Tabla 49. Prueba de Kruskal-Wallis para el Nax de Sincos sometido a diferentes temperaturas.....	78
Tabla 50. Resultados del análisis de la relación Ca: Mg al final del experimento. Suelo de Sincos.....	80
Tabla 51. Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro - Wilks para la relación Ca: Mg del suelo de Sincos sometido a diferentes	

temperaturas	80
Tabla 52. Análisis de varianza del contenido de la relación Ca: Mg del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas.....	80
Tabla 53. Prueba de Duncan para la relación Ca: Mg del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas	81
Tabla 54. Resultados del análisis de la relación K: Mg al final del experimento. Suelo de Sincos.....	82
Tabla 55. Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro - Wilks para la relación K: Mg del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas	82
Tabla 56. Análisis de varianza del contenido de la relación K: Mg del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas.....	82
Tabla 57. Prueba de Duncan para la relación K: Mg del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación esquemática relacionada a la salida de energía del fuego (intensidad del fuego), el impacto medido por la pérdida de materia orgánica (severidad del fuego o de la quema), y respuesta del ecosistema e impactos sociales	32
Figura 2. Rangos de temperatura asociados con varios efectos del fuego (superficie) comparado a la profundidad de penetración dentro del suelo mineral o para quema de la tierra en 5, 15 y 25 cm de hojarasca.	36
Figura 3. Diagrama de flujo del proceso experimental	50
Figura 4. Ubicación de la parcela agrícola. Sincos, Jauja	51
Figura 5. Modelo de muestreo sistemático.....	52
Figura 6. Variación del contenido de arena del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico	55
Figura 7. Variación del contenido de limo del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico.....	57
Figura 8. Variación del contenido de arcilla del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico	59
Figura 9. Variación del pH del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico	61
Figura 10. Variación de la Conductividad Eléctrica (CE) del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico.....	63
Figura 11. Variación de la materia orgánica del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico	65
Figura 12. Variación del fósforo disponible del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico.....	67
Figura 13. Variación del potasio disponible del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico	69
Figura 14. Variación de la capacidad de intercambio catiónico del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico	71
Figura 15. Variación del calcio cambiante del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico.....	73

Figura 16. Variación del magnesio cambiante del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico	75
Figura 17. Variación del potasio cambiante del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico	77
Figura 18. Variación del sodio cambiante del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico.....	79
Figura 19. Variación de la relación Ca: Mg del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico.....	81
Figura 20. Variación de la relación K: Mg del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico.....	83
Figura 21. Ubicación de la muestra de suelo en Sincos.....	106
Figura 22.Extracción de la muestra de suelo en Sincos.....	106
Figura 23. Pesado de la muestra de suelo en Sincos	107
Figura 24. Preparación de la muestra para tratamiento de calor.....	107
Figura 25. Muestras en la mufla para tratamiento de calor	108
Figura 26. Tratamiento de muestras en la mufla a distintas T°	108
Figura 27. Muestras después de tratamiento de calor	109

RESUMEN

Durante octubre 2017 a marzo 2018 se ensayó con muestras de la capa superficial de un suelo agrícola del distrito de Sincos, en condiciones de laboratorio, con el objetivo de determinar el efecto de diferentes niveles de temperatura en las propiedades fisicoquímicas del suelo. Las temperaturas ensayadas fueron: 0, 100, 200, 300 y 400 °C en 200 g de suelo colocado en un horno mufla, para simular el efecto de la quema de vegetación en el campo. Los tratamientos estuvieron dispuestos en un diseño completamente al azar, cada uno con tres repeticiones. Los resultados mostraron un incremento significativo del contenido de arena, pH, conductividad eléctrica, fósforo disponible, potasio extractable, potasio cambiante y relación K: Mg. Además, se observó la disminución de arcilla, materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, calcio y magnesio cambiantes. Las temperaturas no afectaron el contenido de limo, sodio cambiante y la relación Ca: Mg. Estos efectos se observaron en las temperaturas de 300 y 400 °C.

Palabras clave: propiedades fisicoquímicas del suelo, quema del suelo, temperatura del suelo

ABSTRACT

During October to March 2018, samples of the surface layer of an agricultural soil of the Sincos district were tested, under laboratory conditions, with the objective of determining the effect of different temperature levels on the physicochemical properties of the soil. The temperatures tested were: 0, 100, 200, 300 and 400 ° C in 200 g of soil placed in a muffle furnace, to simulate the effect of burning vegetation in the field. The treatments were arranged in a Completely Random design, each with three repetitions. The results showed a significant increase in sand content, pH, electrical conductivity, available phosphorus, extractable potassium, exchangeable potassium and K: Mg ratio; The decrease in clay, organic matter, cation exchange capacity, changeable calcium and changeable magnesium was also observed. Temperatures did not affect the content of silt, changeable sodium, and the Ca: Mg ratio. These effects were observed at temperatures of 300 and 400 ° C.

Keywords: soil burning, soil physical-chemical properties, soil temperature

INTRODUCCIÓN

El fuego es una de las alteraciones del ecosistema de largo alcance en la naturaleza. Los incendios forestales, de pastizales o de residuos, ya sean breves o dramáticos, tienen efectos sobre las propiedades del suelo y tienen impactos duraderos debajo del suelo, a menos que el fuego sea artificialmente alimentado con la adición de combustibles, el aumento de la temperatura en sí es usualmente muy breve y está limitado a unos pocos centímetros superiores del suelo. Sin embargo, la temperatura que resulta de las prácticas de “tala y quema” en los trópicos puede ser suficientemente alta en los pocos milímetros superiores del suelo para causar la descomposición de minerales tales como gibbsita y caolinita (1).

El calor también puede afectar en la descomposición y movimiento de los compuestos orgánicos. Las altas temperaturas esencialmente procesan diferentes fracciones de la materia orgánica, como algunos compuestos hidrocarburos volatilizados moviéndose rápidamente a través de los poros del suelo hacia áreas más profundas y frías. Conforme estos compuestos alcanzan las partículas en la profundidad del suelo, se condensan (solidifican) sobre la superficie de las partículas del suelo y llenan algunos espacios porosos circundantes. Algunos de los compuestos condensados son hidrocarburos repelentes al agua (hidrofóbicos). Consecuentemente, cuando llega la lluvia, el agua de infiltración se reduce en comparación a áreas no quemadas. Este efecto de la temperatura es algo común en regiones semiáridas y puede ser responsable de los desastres de deslizamiento de tierras que ocurren cuando la capa de suelo sobre la zona hidrofóbica se satura con agua de lluvia (2).

El efecto de las altas temperaturas provocadas por el fuego sobre la superficie del suelo en zonas de pastos naturales o residuos de cosecha se puede cuantificar a través de la evaluación de las propiedades del suelo, para determinar su alteración como una consecuencia del efecto de diferentes niveles de temperatura; el fuego provoca altas temperaturas en el suelo y no es uniforme.

Se plantea la hipótesis que, al someter una muestra de suelo a diferentes niveles de temperatura, se afectan las propiedades relacionadas a la distribución del tamaño de partículas (propiedad física) y las propiedades químicas del suelo. Esta alteración del suelo puede evidenciarse por una menor cantidad de materia orgánica, disminución del pH, variación en el contenido de nutrientes e incremento de sales disueltas, entre otros efectos.

La información por obtenerse es de gran importancia, considerando que los suelos del distrito de Sincos, periódicamente, cada inicio de campaña agrícola, son sometidos a diferentes quemas de vegetación, y su alteración sistemática, por efecto de las altas temperaturas, contribuye a la pérdida de calidad y aptitud para las generaciones venideras. Además, esta zona semiárida de la sierra del Perú, practica una agricultura, predominante de secano, donde el suelo se constituye en un recurso natural muy importante que debe manejarse adecuadamente, de lo contrario la pérdida de fertilidad y de vegetación, aumentarán los riesgos de erosión y degradación del suelo.

La investigación se divide en cuatro capítulos. En el capítulo I se detalla el planteamiento y formulación del problema, los objetivos, justificación e importancia, hipótesis y descripción de variables.

En el capítulo II se presenta el marco teórico y consta de los antecedentes del problema, bases teóricas y definición de términos básicos. El método general de investigación es hipotético-deductivo.

En el capítulo III se describe la metodología, el método y alcance de la investigación, diseño de la investigación, población y muestra, técnicas e instrumentos de recolección de datos. En el método específico de investigación se realizaron los análisis de suelo utilizando una metodología estándar para su caracterización y contenido de metales pesados. En el capítulo IV, se describen los resultados y discusión.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 Planteamiento y formulación del problema

1.1.1 Planteamiento del problema

La investigación en diferentes ecosistemas demuestra que la quema tiene impactos sustanciales y altamente variables sobre los nutrientes del suelo y la productividad del ecosistema. El fuego puede crear importantes cambios en las características fisicoquímicas del suelo, de consecuencias y duración variable. Cuando la vegetación y la paja superficial son quemadas, la ceniza usualmente incrementa el pH del suelo, así como un incremento en la disponibilidad de nutrientes para las plantas (3). La cantidad de cenizas que retornan al suelo después de la quema pueden ser altamente variables, dependiendo del peso y la distribución espacial de la vegetación y paja acumulada y condiciones de quema (4). Los cambios principales en las características del suelo son más fácilmente detectados sobre la superficie del suelo (los primeros centímetros de suelo mineral) e inmediatamente después del fuego. La magnitud de este efecto depende parcialmente de la intensidad y duración del fuego, que está relacionado con las características de la cubierta vegetal (5).

Anualmente, el fuego afecta una enorme extensión del planeta y es provocado por las actividades humanas convirtiéndose en un problema ambiental de suma importancia y una seria amenaza para la biodiversidad (6). Según la *Joint Research Centre* de los Estados Unidos, en el año 2000, más de

3.5 millones de km² fueron quemados alrededor del mundo (7).

El fuego constituye una de las principales perturbaciones del ciclo de nutrientes en el ecosistema (8) y el efecto de la quema sobre las propiedades físicas, químicas, bioquímicas y microbiológicas ha sido estudiado por muchos años (8, 9, 10, 11,12). Debido a la gran variación en la severidad, frecuencia y características del fuego, la variedad de ecosistemas afectados y la complejidad de los efectos de la quema sobre el suelo, este campo de investigación es amplio y está en constante progreso (15).

Los efectos del fuego en el suelo van a depender de la topografía del lugar, intensidad del proceso de erosión, tasa de regeneración de la cubierta vegetal postincendio, recurrencia, intensidad y duración del fuego. Los principales impactos de los incendios forestales son a nivel de las propiedades y productividad del suelo. Estos impactos se traducen en: erosión, pérdida de nutrientes, disminución de la materia orgánica y alteración de la vegetación (14).

En el Perú, los incendios forestales están relacionados con la habilitación de chacras de cultivo, quema de pastos, malezas y rastrojos. La ocurrencia de incendios forestales en el periodo 2012-2016 han afectado 93 365,8 ha de cobertura natural, adicionalmente se han destruido 94 239,9 ha con cobertura vegetal; asimismo, se han perdido 5 540,80 ha de cultivo agrícola, según data recogida de Indeci (13).

En el año 2016, en el departamento de Junín, el área de cobertura vegetal perdida fue de 180 ha, a causa de 5 incendios forestales; siendo en el valle del Mantaro, las quemadas de rastrojos de cosecha en cultivos de: cebada, trigo, quinua y avena una práctica común para los productores agrícolas, durante la preparación del suelo para una próxima siembra, debido a la ventaja de limpiar el suelo de paja o residuos vegetales del cultivo. Sin embargo, el efecto del fuego sobre las propiedades fisicoquímicas de los primeros centímetros de un suelo agrícola es de diferente magnitud, y requiere cuantificarlos; razón por la que la tesis se realiza en el distrito de Sincos debido a que representa una zona donde la agricultura es de secano.

1.1.2. Formulación del problema

1.1.2.1. Problema general

¿Cuál es el efecto de la quema a T° crecientes, de 0 °C a 400 °C en las propiedades fisicoquímicas de un suelo agrícola de Sincos, Jauja?

1.1.2.2. Problemas específicos

¿Cuál es el efecto de la quema a T° crecientes, de 0 °C a 400 °C en la distribución del tamaño de partículas (propiedad física) de un suelo agrícola de Sincos, Jauja?

¿Cuál es el efecto de la quema a T° crecientes, de 0 °C a 400 °C en el contenido de carbono orgánico, CIC, pH, P, K, cationes cambiabiles y relaciones catiónicas (propiedades químicas) en un suelo agrícola de Sincos, Jauja?

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Determinar el efecto de la quema a T° crecientes, de 0 °C a 400 °C en las propiedades fisicoquímicas de un suelo agrícola de Sincos, Jauja.

1.2.2. Específicos

Describir y comparar el efecto de la quema a T° crecientes, de 0 °C a 400 °C en el tamaño de partículas (propiedad física) de un suelo agrícola de Sincos, Jauja.

Describir y comparar el efecto de la quema a T° crecientes, de 0 °C a 400 °C, en el contenido de carbono orgánico, CIC, pH, P, K, cationes cambiabiles y relaciones catiónicas (propiedades químicas) en un suelo agrícola de Sincos, Jauja.

1.3. Justificación e importancia

1.3.1. Justificación

La información de este estudio será de particular interés para evaluar las propiedades del suelo, especialmente físicas y químicas, cuya interacción determinan la calidad y fertilidad de los suelos de manera sostenible, en suelos

donde se practica la quema de rastrojos de cosecha, para permitir la labranza en la siguiente campaña agrícola, debido a la estacionalidad de las lluvias, por ser una zona semiárida, y donde se practica la agricultura de secano.

Después del fuego, los cambios en las propiedades físicas e hidráulicas del suelo son importantes para controlar la magnitud de respuesta ante la lluvia. Las propiedades físicas de interés incluyen la materia orgánica, la densidad de volumen, y la fuerza y persistencia de repelencia del suelo al agua. Los cambios en estas propiedades físicas influyen en las propiedades hidráulicas del suelo, en la conductividad hidráulica saturada, y absorción del agua, directamente impactan en la infiltración y generación de escorrentía (17).

1.3.2. Importancia de la investigación

Los impactos de las altas temperaturas sobre el suelo dependen de la severidad de la quema de vegetación, aplicado al sistema suelo, se refiere directamente a la pérdida de materia orgánica impulsado por el calentamiento del suelo (18). Comúnmente, se carece de la comprensión sistemática del impacto de la severidad de la quema sobre las propiedades del suelo, lo que es aplicable a múltiples tipos de suelo y regímenes de fuego (19). Los datos de campo que examinan este problema han demostrado ser instructivos, sin embargo, las quemas experimentales de suelos en el laboratorio, para simular la severidad del fuego en el campo ofrecen la posibilidad de evaluar el efecto del fuego de una manera controlada.

La manera más controlada para evaluar y cuantificar cambios en las propiedades del suelo como resultado del efecto del fuego es a través de experimentos de laboratorio. Trabajos previos sobre el calentamiento experimental del suelo reportan cambios en las propiedades del suelo como consecuencia de la severidad de la quema, utilizan muestras alteradas, usan tratamientos a diferentes temperaturas. Sin embargo, simular el efecto del fuego sobre un núcleo de suelo es un desafío, se ha observado que calentando los suelos en una mufla a temperaturas alrededor de 300 °C por 30 minutos puede resultar en efectos similares a la quema del suelo por 5 minutos (20).

1.4. Hipótesis

1.4.1. General

Ho: la quema a T° crecientes, de 0 °C a 400 °C no afecta las propiedades fisicoquímicas de un suelo agrícola de Sincos, Jauja.

Ha: la quema a T° crecientes, de 0 °C a 400 °C afecta las propiedades de un suelo agrícola de Sincos, Jauja.

1.4.2. Específicas

La quema afecta significativamente la distribución del tamaño de partículas (propiedad física) de un suelo agrícola de Sincos, Jauja a T° crecientes, de 0 °C a 400 °C.

La quema afecta significativamente las siguientes propiedades químicas: pH, CE, materia orgánica, P, K, CIC, cationes cambiabiles y relaciones catiónicas, en un suelo agrícola de Sincos, Jauja a temperaturas crecientes, de 0 °C a 400 °C.

1.5. Descripción de variables

1.5.1. Variable independiente: Temperatura (°C)

Dimensión: °C

1.5.2. Variable dependiente

Propiedades fisicoquímicas del suelo

1.5.3. Operacionalización de variables

Tabla 1.

Operacionalización de variables

Variables	Definición	Dimensiones	Indicador
Independiente: Temperatura (T°)	Magnitud física que permite medir el grado de calor (21)	°C	<ul style="list-style-type: none"> - 0 °C - 100 °C - 200 °C - 300 °C - 400 °C
Dependiente: Propiedades fisicoquímicas del suelo	Componentes de la fase sólida y líquida del suelo en permanente interacción: materia orgánica, pH, fósforo disponible, potasio disponible, textura, conductividad eléctrica (CE), cationes cambiables, relaciones catiónicas (16).	<ul style="list-style-type: none"> - Alto - Bajo - Medio 	<ul style="list-style-type: none"> - pH - CE (dS.m⁻¹) - MOS (%) - P disponible (ppm) - K disponible (ppm) - Clase textural - CIC (meq.100 g⁻¹) - Ca⁺² (meq.100 g⁻¹) - Mg⁺² (meq.100 g⁻¹) - K⁺² (meq.100 g⁻¹) - Na⁺² (meq.100 g⁻¹) - Ca⁺² : Mg⁺² - K⁺ : Mg⁺²

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

En la tesis *“Efecto de la quema controlada sobre la población microbiana en suelos con pasturas en la SAIS Túpac Amaru-Junín, Perú”*, se evaluó el efecto de la quema controlada sobre las poblaciones de bacterias aerobias, bacterias anaerobias, hongos y dos géneros de Bacterias Libres Fijadoras de Nitrógeno (BLFN, *Azotobacter* sp. y *Azospirillum* sp.) en suelos con pasturas de la Sociedad Agrícola de Interés Social Túpac Amaru, Junín. Los muestreos se realizaron desde el final de la época seca (septiembre del 2001) hasta el inicio de la siguiente época seca (junio del 2002). La quema se llevó a cabo a inicios del mes de octubre, empleando la metodología de una quema frontal, a favor del viento. Las características del suelo como humedad, fósforo, potasio, CIC, CE, cationes, materia orgánica, nitrógeno y pH no variaron después de realizada la quema. La quema no afectó ($P > 0.05$) a las poblaciones de bacterias aerobias, bacterias anaerobias y hongos. En los géneros de BLFN aislados, no se observaron variaciones grandes en las muestras obtenidas inmediatamente después de la quema, sin embargo, en los análisis de varianza de los demás muestreos se obtuvieron altos valores para las poblaciones del Cuadrado Sin Quema, siendo mucho menores las varianzas en el Cuadrado Quema. La aplicación de fuego en el Cuadrado Quema habría provocado una mayor estabilidad poblacional, mostrando la población de BLFN del Cuadrado Sin Quema una mayor variabilidad espacial (23).

En la tesis *“Changes in Soil Organic Matter Pools and Carbon Mineralization as Influenced by Fire Severity”*, se examinó el efecto de la severidad creciente del fuego sobre la mineralización y formas de materia orgánica del suelo (MOS) incubando los suelos tratados con una severidad de fuego a escala. El fuego se aplicó sobre perfiles de suelo reconstruidos (horizontes O, A1 [0-1 cm], y A2 [1 - 2 cm]). La quema simuló baja, media y alta severidad del fuego. Los suelos orgánicos y minerales fueron incubados por 180 días y la producción de CO₂ fue medida con trampas de cal sódica. Se analizó la composición de la materia orgánica del suelo pre y postincubación usando una extracción alcalina. La alta severidad de la quema resultó en una baja tasa de descomposición sobre la base de carbono. El carbono del ácido fúlvico en los horizontes control y en el de baja severidad fue reducido en 13% por la incubación, que estuvo negativamente correlacionada con el carbono acumulado mineralizado ($r = - 0.564$). Después de la incubación, la composición de la MOS de los horizontes O quemados permanecieron diferentes del control. La alta severidad de la quema causada al suelo mineral para tener inicialmente altas tasas de mineralización de carbono (C), lo que hizo que desapareciera al final de la incubación. La concentración de ácidos fúlvicos fue reducida en 61% y 38% durante la incubación de los horizontes A1 y A2, respectivamente, retornando la composición de la MOS a niveles de control. La suma de formas insolubles alcalinas (huminas) de la MOS constituyó el 74 y 61% del C y N total del suelo, respectivamente, que no fue significativamente diferente entre tratamientos. La severidad del fuego examinada mostró que el principal impacto sobre la MOS ocurrió en el horizonte O y algún cambio relacionado al fuego en el suelo mineral no fue persistente (25).

En la tesis *“Slash and burn effect on soil quality of an Alfisol: Soil Physical properties”* se tuvo como objetivos evaluar y comparar los efectos directos e inmediatos de la tala y quema en las propiedades físicas del suelo a 0 - 0.05 y 0.05 – 0.10 m de profundidad con los agregados de lombrices recolectados en la superficie de un Alfisol en bosque secundario y en barbecho natural en el sur occidental de Nigeria; las lombrices de la superficie del suelo fueron recolectadas antes y después de la quema. En respuesta a la quema, se redujo el volumen de poros y las tasas de infiltración, absorción y conductividad hidráulica, se

redujeron concomitantemente. Las tasas de infiltración, los niveles de adsorción y la conductividad hidráulica saturada disminuyó significativamente después de la quema en 64.3, 58.9 y 64.3%, respectivamente, en el lugar 1 y 47.9, 58.9 y 47.8%, respectivamente, en el lugar 2. El diámetro promedio de poros disminuyó significativamente después de la quema en 30.8 y 43.5% en el lugar 1 en 0-0.05 y 0.05 – 0.10 m de profundidad respectivamente, y en 46.2 y 44.7% en el lugar 2 a 0-0.05 y 0.05-0.10 cm de profundidad, respectivamente. Una reducción apreciable, pero no significativa fue registrada en los agregados estables en agua para los suelos en ambos lugares. Sin embargo, los agregados estables de lombrices en el lugar 1 incrementaron significativamente de 0.765 a 0.873 kg/kg. A pesar de la disminución significativa de 19.7% en materia orgánica, la estabilidad de los agregados de lombrices mejoró después de la quema. La tala y quema no afectó la clase de suelo, pero hubo apreciables cambios en la distribución del tamaño de partícula de los suelos después de la quema. Los depósitos de cenizas en los espacios porosos probablemente representaron una reducción en la capacidad de agua disponible a 0 - 0.05 y 0.05 - 0.10 m de profundidad, respectivamente, en el lugar 1; y 15.1 y 6.6% de reducción en 0 - 0.05 y 0.05 - 0.10 m de profundidad, respectivamente, en el lugar 2 después de la quema. Hubo un ligero incremento de 0.8 y 4.0% en la densidad de volumen a las respectivas profundidades. Este estudio mostró que la tala y quema puede tener un impacto inmediato y directo sobre las propiedades físicas de un Alfisol (14).

En la tesis *“Soil phosphorus availability after slash, and burn fires of different intensities in rubber agroforests in Sumatra, Indonesia”*, se realizaron experimentos de campo y laboratorio para: (i) determinar la capacidad de adsorción de P y constantes de afinidad para un suelo forestal expuesto a diferentes intensidades de fuego en un experimento controlado al horno (solo efectos del calor); (ii) comparar las características de adsorción de suelo quemado al horno con suelo quemado en el campo (efecto de adición de calor y cenizas); y (iii) determinar la relaciones entre cambios inducidos por el fuego en el área superficial específica (indicador de capacidad de adsorción de P), carbono disuelto del suelo (competidor de P para sitios de adsorción) e índices de disponibilidad de P para la planta. Los experimentos de adsorción usando

suelo forestal calentado al horno mostró un incremento en la máxima cantidad de fósforo que puede retener (capacidad de adsorción de P, X_m) y en la fuerza con la que este fósforo es retenido a las partículas del suelo (constante de afinidad, K) con un calentamiento a 450 °C. La quema en campo resultó en similar incremento en X_m pero redujo las constantes de afinidad en los 15 cm superficiales del suelo. El incremento en X_m estuvo relacionado a un incremento en el área superficial específica de la fracción mineral, inducido por el fuego. La adición de cenizas en la quema de campo parece ser responsable para la disminución observada en fósforo. El incremento en X_m se espera que aumente la necesidad para fertilizantes de P tan pronto como el P en solución disminuye a niveles antes de la quema. Estos cambios basados de la mineralogía en las características de adsorción de P de la superficie del suelo son esperados a largo plazo y podrían reducir el periodo de tiempo para la producción sostenible de cultivos anuales, establecimiento de nuevas plantaciones de caucho a partir de semillas, así como afecte la pérdida de suelo y producción sostenible de caucho (15).

En la tesis *“Impact of fire on soil nutrients in Central Semiarid Argentina”*, tuvo como objetivo estudiar el efecto inmediato de dos quemas controladas sobre el carbono orgánico, y el contenido total y disponible de N, P, y S de la superficie de suelos del sureste de la región del Caldenal, Argentina. También se evaluó el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), y cationes cambiabiles. Las muestras de evaluación fueron realizadas anualmente, entre las quemas, durante tres años. El suelo inicial no quemado cubierto con vegetación arbustiva tuvo una mayor concentración de nutrientes disponibles y totales que el suelo cubierto con vegetación herbácea. Los valores de pH y CIC del suelo fueron ligeramente más bajos en el suelo con arbustos. El primer fuego controlado generalmente causa un efecto benéfico sobre los elementos totales inmediatamente o uno a dos años después de la quema. Esto también causó un considerable flujo de los nutrientes disponibles que fueron más persistentes con vegetación de arbustos. Los cambios fueron temporales y, generalmente, los niveles de nutrientes retornaron a aquellos de los suelos no quemados durante el segundo o tercer año después de la quema. Por otro lado, un segundo fuego moderado controlado experimentado tres años después mostró un efecto no

medible sobre la mayoría de las propiedades del suelo, pero se observó después de la quema, una disminución del S total en suelo con gramíneas y N-NO₃- en suelos con bosques maderables, señalando el riesgo de una disminución de la fertilidad del suelo. Consecuentemente, son necesarios estudios posteriores en la región del Caldenal para evaluar cambios en los suelos bajo circunstancias de diferentes frecuencias de fuego (16).

En la tesis *“Efecto de la temperatura sobre coloides de suelos agrícolas mediante dispersión dinámica de la luz”*, se tuvo como objetivo estudiar mediante dispersión dinámica de la luz (DLS) el efecto de la temperatura sobre la fracción coloidal de suelos agrícolas con el fin de establecer la aplicabilidad de la técnica de DLS en la evaluación del impacto de las quemas, de origen natural o antropogénico de los suelos. Para ello, se recolectaron y caracterizaron dos muestras de suelos procedentes de los departamentos de Córdoba y valle del Cauca. La fracción coloidal fue extraída mediante una variante del método de Bouyoucos y sometida a diferentes tratamientos térmicos (desde 150 a 550 °C). Las muestras se caracterizaron por análisis elemental, FT-IR, DLS y se evaluó su CIC. Se concluyó que las propiedades de la fracción coloidal son fuertemente alteradas por efecto de la temperatura, además de evidenciarse una disminución de la CIC (desde 76 a 35 y desde 103 a 26 cmol/kg (+)/kg suelo), el incremento de tamaño de partícula (desde 639 ± 165 a 1250 ± 435 y 606 ± 102 a 1540 ± 320) para S- Córdoba y S-Valle, respectivamente, así como la eliminación de la materia orgánica (22).

En la tesis *“Estudio de las propiedades físicas y químicas del suelo producidas por la quema controlada de vegetación en el municipio de Cumaribo, departamento de Vichada, Manizales, Colombia”*, se planteó como objetivo general evaluar los cambios producidos en el suelo después de las quemas controladas de vegetación. Las quemas de vegetación han sido una tradición ancestral de las comunidades indígenas y colonos del municipio y de todo el departamento del Vichada, al igual que en los demás departamentos del país; para realizar la siembra de cultivos los agricultores queman la vegetación en época de verano con el fin de eliminar las malezas (arvenses) y dejar el lote limpio para poder sembrar las semillas, por otra parte se tiene la creencia que la

quema de vegetación abona o fertiliza los suelos presentándose un mayor desarrollo de los cultivos. Se utilizó un DBA (Diseño en Bloques al Azar) con un arreglo factorial 23 (2 momentos de toma de datos: 1 hora antes de la quema y a los 30 días después de la quema; 2 manejos: con quema y sin quema; 2 profundidades: 0 - 10 cm y 10-20 cm, con 3 repeticiones, se utilizaron 6 unidades experimentales en forma de cuadro con 50 m de lado cada una (2.500 m²) y una distancia entre calles de 10 metros; evaluando los efectos de las quemas controladas de vegetación en las propiedades físicas y químicas del suelo. La periodicidad de las quemas es un factor que podría regular las pérdidas de nutrientes. Si las quemas ocurren en forma anual, puede producirse una reducción en el capital de nutrientes del suelo, especialmente de materia orgánica, P y K, pero si estas ocurren cada dos o tres años se reducen las pérdidas o se puede alcanzar un balance estable (24).

En la tesis *“Changes in soil phosphorus, and acid phosphatase activity immediately following forest fires”*, se muestreó el suelo a dos profundidades (0 - 5 cm y 5 - 10 cm) en tres suelos afectados por incendios forestales y en un suelo sujeto a un fuego controlado, entre 1 día y un mes después de la quema. En todos los casos un suelo no quemado fue usado como control. El fuego controlado no afectó la actividad de la fosfatasa ácida y tuvo solo efectos muy ligeros sobre la distribución de la fracción de P, en buena concordancia con las bajas temperaturas del suelo registradas durante el fuego (nunca > 50 °C en los 5 cm superiores de suelo). Por otro lado, el incendio forestal redujo fuertemente la actividad de la fosfatasa ácida y tuvo un intenso efecto mineralizante sobre el P orgánico; consecuentemente el P inorgánico incrementó grandemente y las distribuciones de las fracciones de P fueron profundamente alteradas. Las reducciones en la actividad de la fosfatasa ácida y la extensión de la oxidación del P orgánico en las diferentes muestras de suelo fueron utilizadas para estimar las temperaturas del suelo alcanzadas durante cada fuego. Se observó una relación cercana entre las temperaturas estimadas del suelo en esta manera y cambios en la distribución de P dentro de las diferentes fracciones orgánicas e inorgánicas (26).

En la tesis *“Plant Ash and Heat Intensity Effects on Chemical and Physical*

properties of two contrasting soils”, se sometió dos suelos (un yesífero y otro calcáreo) a un calentamiento artificial e incorporación de cenizas y se compararon los cambios en las propiedades físicas y químicas seleccionadas. Los dos suelos estudiados fueron seleccionados para proporcionar un rango de características en los suelos del valle semiárido del Ebro (Noreste de España). Las muestras de ambos suelos fueron calentadas por 30 minutos en un horno mufla a temperaturas de 25, 150, 250 y 500 °C. Las cenizas fueron agregadas solo en muestras calentadas a 250 °C, en una cantidad relacionada a la biomasa de plantas creciendo en cada suelo (dos veces la cantidad en el suelo calcáreo que en el suelo yesífero). Al incrementar la intensidad del calor se incrementó la combustión de la materia orgánica, así como la disponibilidad de nutrientes. El calentamiento del suelo a 250 °C causó una disminución en el pH y un incremento en la conductividad electrolítica (CEe) y calcio soluble. El calentamiento a 500 °C causó un incremento de pH y una disminución en CEe y Ca soluble. El contenido de N total disminuyó a temperaturas superiores a 250 °C, con 1/3 volatilizado. Los cambios en las propiedades químicas fueron similares para ambos suelos, aunque se encontraron diferencias cuantitativas entre los suelos. La capacidad de intercambio de cationes (CIC) fue reducida para suelos yesíferos calentados a 500 °C y a 250 °C para suelos calcáreos. El calentamiento incrementó las partículas del tamaño de la arena por la fusión de la arcilla, mayor en un suelo calentado a 500 °C. La estabilidad de los agregados del suelo de ambos suelos fue reducida a 250 °C y con mayor reducción a 500 °C, probablemente debido a la reducción en la materia orgánica y el contenido de partícula del tamaño de la arcilla. Se encontró una correlación negativa entre la estabilidad estructural y la erodabilidad del suelo. La densidad de volumen de partícula incrementó en ambos suelos cuando se calentó a 500 °C. La disponibilidad de agua incrementó cuando los suelos fueron calentados a 500 °C, probablemente debido a las modificaciones de la textura y estructura. La adición de cenizas incrementó el contenido de materia orgánica, relación C/N, y pH en ambos suelos e incrementó la disponibilidad de nutrientes. Estas respuestas fueron mayores en suelos calcáreos que en suelos yesíferos. Las propiedades físicas del suelo no fueron significativamente modificadas por la adición de cenizas (27).

En la tesis *“Impact of prescribed burning on soil properties in a Mediterranean area (Granada, SW Spain)”*, se estudió el efecto de las quemas preventivas o fuegos de baja intensidad en suelos mediterráneos. El objetivo de este estudio fue determinar las modificaciones producidas en las propiedades del suelo más importantes para el cultivo: pH, materia orgánica, carbonatos y nitrógeno orgánico. El área de muestreo se localizó cerca de la abadía de Sacromonte, en las afueras de la ciudad de Granada (Suroeste de España), que solía ser una zona dedicada al cultivo de olivos y cereales que actualmente está abandonada y solo se encuentran matorrales y algunos árboles. Se efectuó una quema controlada de seis horas sobre un área de 13.300 m² y se tomaron 11 muestras antes de la quema, a los cuatro días y al año. Los resultados mostraron diferencias significativas en los contenidos de materia orgánica y nitrógeno que sufren un aumento, mientras pH y carbonatos disminuyen después de la realización de la quema. Todo esto produjo un incremento en la fertilidad (28).

En la tesis *“Soil Biology, Chemical, and Physical Properties After a Wildfire Event in a Eucalyptus Forest in the Pampa Biome”*, se realizó un muestreo de suelo y cama de plantas, en tres áreas: en un bosque que no fue afectado por el fuego, en el bosque afectado por el fuego, y en un área adyacente de pastos naturales (la vegetación original). Se colectaron 7 muestras de capas de 0.00 - 0.05 y 0.05-.0.20 m, de cada parcela para análisis biológico y tres muestras fueron colectadas para análisis físico y químico. Las muestras de suelo alteradas fueron colectadas para determinar pH, materia orgánica, acidez y contenido de nutrientes. Se colectaron muestras no alteradas para determinar microporosidad, macroporosidad, porosidad total y densidad del suelo. El fuego incrementó los valores de pH, CIC, y saturación de bases, así como el contenido de K, Ca y Mg; disminuyó la acidez potencial y el contenido de P en el suelo. Las propiedades físicas no fueron alteradas por el incendio forestal. La abundancia total de macrofauna y de anélidos, arácnidos, coleóptera e isópteros disminuyó debido al fuego forestal, resultando en una baja diversidad del suelo. La abundancia de himenópteras aumentó debido al evento del fuego. La actividad alimenticia de los organismos en la capa superficial del suelo disminuyó debido al fuego. El fuego forestal en el bosque de eucalipto en la Pampa Biome alteró las propiedades químicas y biológicas (29).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. La temperatura

La temperatura se define como la magnitud física que permite medir el grado de calor. Esta noción es bastante intuitiva ya que se refiere a las sensaciones de calor y frío. Sin embargo, los sentidos del ser humano mezclan los efectos de la temperatura y los de transferencia de calor (30).

Por mucho tiempo, estos dos conceptos fueron confundidos y es solamente cuando aparece la termodinámica como disciplina en sí, que se pudo definir más claramente la temperatura. Hoy, gracias a esos descubrimientos se pueden realizar mediciones de temperatura en diferentes puntos de la tierra, fuera o no del sistema solar. Así como saber la temperatura de solidificación o de ebullición, no solamente del agua sino de todos los cuerpos químicos (30).

Existen dos escalas comunes de temperatura en las industrias química y biológica, ellas son grados Fahrenheit (°F) y Celsius (°C). Es muy frecuente que se necesite obtener valores equivalentes de una escala a la otra. Ambas usan el punto de congelación y el punto de ebullición del agua a una atmósfera de presión como referencia. Las temperaturas también se expresan como absolutas en Kelvin (K) (en el SI) o grados Rankine (°R) (31).

2.2.2. El fuego

2.2.2.1. Intensidad del fuego

La intensidad del fuego describe el proceso de combustión física de energía liberada de la materia orgánica. Por lo tanto, sería lógico considerar el uso del término “intensidad” en el campo de la física, donde es definido como una medida del flujo de energía en un tiempo promedio, en otras palabras, la energía por unidad de volumen multiplicado por la velocidad a la que la energía se mueve; el vector resultante tiene la unidad de $W.m^{-2}$ (32).

Una alternativa es la intensidad de la línea de fuego, que es la tasa de transferencia de calor por unidad de longitud de la línea de fuego ($kW.m^{-1}$). Esto representa la energía radiante o convectiva en el frente llameante y es una importante característica para la propagación del fuego, y una información crítica

para las actividades de supresión del fuego y ha sido incorporado en los cálculos de tasas de peligro de fuego. Cada vez más, la intensidad de la línea de fuego es presentada en la literatura como la única medida apropiada para la intensidad del fuego (33).

La intensidad de la línea de fuego es más frecuentemente usada en ecosistemas forestales ya que hay una literatura bien desarrollada mostrando una relación entre la intensidad de la línea de fuego o longitud de la llama y la altura abrasadora de coronas de coníferas y otros impactos biológicos del fuego. Sin embargo, algunos efectos del fuego están más cercanamente unidos a diferentes intensidades métricas del fuego. Por ejemplo, modelar el consumo de residuos orgánicos del suelo (entre otras cosas) requiere la comprensión de la combustión latente, que está más relacionado a la temperatura en la superficie del suelo y la duración del calentamiento que a la intensidad de la línea de fuego (34).

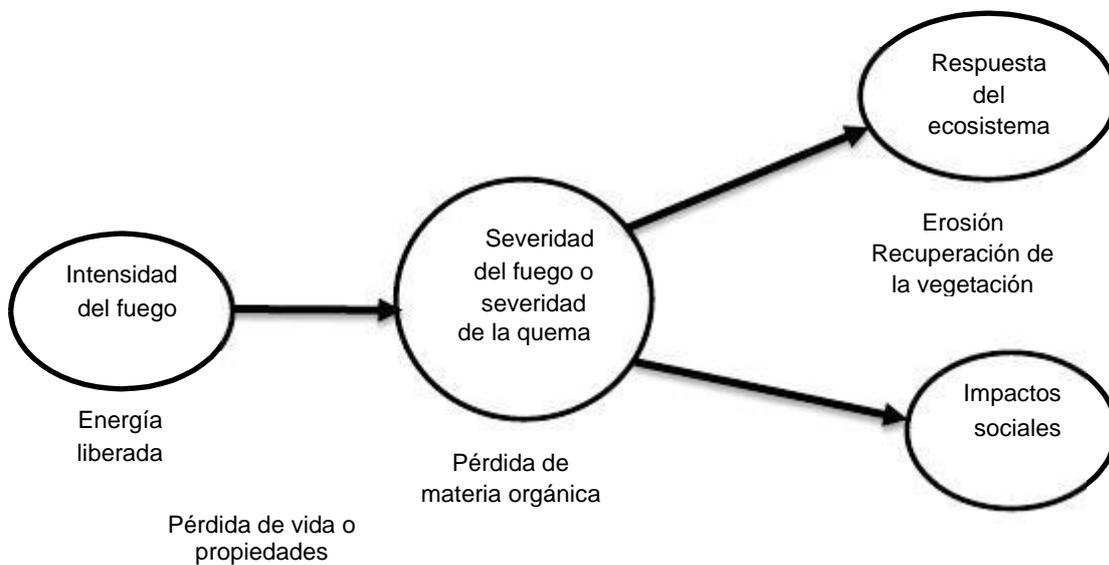


Figura 1. Representación esquemática relacionada a la salida de energía del fuego (intensidad del fuego), el impacto medido por la pérdida de materia orgánica (severidad del fuego o de la quema), y respuesta del ecosistema e impactos sociales (32)

También, el desarrollo de capas no humedecidas en el suelo puede estar más cercanamente relacionado a la duración del calentamiento del suelo (35), y la supervivencia de bancos de semillas o rizomas puede estar cercanamente unido a la duración del calentamiento, así como a las máximas temperaturas del

suelo (36). La medida de estas otras métricas es frecuentemente necesaria debido a que la intensidad de la línea de fuego puede estar débilmente correlacionada con la máxima temperatura o duración del calentamiento (37). Aunque la intensidad de la línea del fuego proporciona información para los bomberos involucrados en contener el fuego, la temperatura y la duración del calentamiento (tiempo de residencia) puede ser información más crítica para administradores que tiene que ver con condiciones de quema prescritos requeridos para retener componentes sensitivos del ecosistema (38).

2.2.2.2. Severidad del fuego

El término severidad del fuego emergió de la necesidad de proporcionar una descripción de cómo la intensidad del fuego afectó los ecosistemas, particularmente siguiendo la línea de fuego donde la información directa de la intensidad del fuego estuvo ausente y los efectos son frecuentemente algo variables dentro y entre diferentes ecosistemas (32).

Algunas definiciones de la severidad del fuego han sido algo generales acerca de los impactos del fuego, es decir, el grado de cambio ambiental causado por el fuego (39), y consecuentemente no han permitido el uso de métricas útiles operacionales. Sin embargo, estudios más empíricos que intentaron medir la severidad del fuego tuvieron una base común que se centra sobre la pérdida o descomposición de materia orgánica, sobre y debajo del suelo. Las métricas sobre el suelo tales como el volumen de la corona quemada en bosques o diámetro de ramas remanentes usadas en bosques y arbustos son indicadores de pérdida de biomasa (40). Las características del suelo incluyen la pérdida del *litter* y las capas orgánicas y características de las cenizas, todo lo que refleja en diversos grados los niveles de materia orgánica consumida (41).

2.2.2.3. Severidad de la quema

El término severidad de la quema ha ganado popularidad en años recientes, pero ha causado alguna confusión debido a que es frecuentemente usado indistintamente con severidad del fuego, y frecuentemente está basado en métricas similares a medida de severidad del fuego (42).

Cuando el término severidad de la quema es usado indistintamente con severidad del fuego, puede conducir a alguna confusión, pero eso no es un problema significativo. Sin embargo, donde los términos han sido bien definidos para incluir severidad del fuego y respuestas ecosistémicas, puede conducir a una significativa confusión en la medida que tiene el potencial de factores de confusión con sus diferentes efectos. Se recomienda que la severidad del fuego (o quema) y respuesta ecosistémica sean evaluados separadamente (32).

Las aplicaciones de sensores remotos usan el término severidad de la quema antes que severidad del fuego para evaluar áreas quemadas, y como los sensores remotos se han incrementado en las evaluaciones de áreas quemadas, es que se propone el uso del término severidad de la quema. En algunos de los estudios iniciales de aplicaciones de sensores remotos para la evaluación de áreas quemadas, el término severidad de la quema fue usado para calcular el cálculo del índice de los sensores satelitales (43). Varios sensores remotos (*Modis*, *Aviris*) han probado su habilidad para verificar medidas de campo de severidad y el sensor *Landsat Thematic Mapper* es ampliamente aceptado como el más apropiado para esta tarea (44). Los datos de estos sensores remotos son usados para generar un índice conocido como la Relación de Quema Normalizada diferenciada (RQNd) que es un término preferible sobre la severidad de la quema (32).

2.2.2.4. Respuesta del ecosistema

La intensidad del fuego, la severidad del fuego y la severidad de la quema son medidas operacionales, pero son mayormente solo de valor y están lejos de predecir la respuesta del ecosistema, tanto del suelo como de la vegetación. En la predicción de la respuesta del ecosistema, los científicos del fuego toman uno de los dos enfoques: el enfoque descriptivo o el enfoque basado en procesos (45, 46). El primero da descripciones estadísticas de las relaciones entre, por ejemplo, la intensidad del fuego y severidad del fuego, o severidad del fuego y respuesta del ecosistema, y esto es frecuentemente el único enfoque disponible cuando se estudian impactos de incendios forestales. Bajo condiciones experimentales más controladas uno puede usar el enfoque basado en procesos que estudia los caminos directos de las medidas de intensidad del fuego a

severidad del fuego o de intensidad del fuego a variables de respuesta del ecosistema, y ensaya mecanismos intrínsecos. En relación con el proceso estudiado, es claro que muchos factores bióticos y abióticos también entran en las relaciones entre la intensidad del fuego y la respuesta del ecosistema (47).

2.2.2.5. Umbrales de temperatura de las propiedades del suelo

Un importante carácter cuando se evalúa el efecto del fuego sobre las propiedades del suelo es la temperatura a la que los nutrientes son volatilizados o qué daño irreversible ocurre a una propiedad particular del suelo. Esta temperatura es llamada umbral de temperatura (12). El umbral de temperatura ha sido identificado para numerosas propiedades físicas, químicas y biológicas. Los rangos de temperatura sobre algunas propiedades del suelo cambian en respuesta al calentamiento del suelo han sido clasificados en tres clases:

- Propiedades del suelo relativamente no sensitivas que no cambian hasta que la temperatura ha alcanzado casi 842 °F (450 °C). Esta clase incluye arcillas, cationes (calcio, magnesio, potasio) y otros minerales tales como manganeso.
- Propiedades moderadamente sensitivas que son cambiadas a temperaturas entre 212 y 752 °F (100 y 400 °C). Los materiales que pertenecen a esta clase incluyen azufre, materia orgánica, y propiedades del suelo dependientes de la materia orgánica.
- Propiedades sensitivas del suelo son aquellas que son cambiadas a temperaturas menores de 212 °F (100 °C). Ejemplos de materiales sensitivos son los microorganismos vivos (por ejemplo, bacterias, hongos, micorrizas), raíces de plantas y semillas. Esta clase también incluye muchos de los ciclos de nutrientes en los suelos (63).

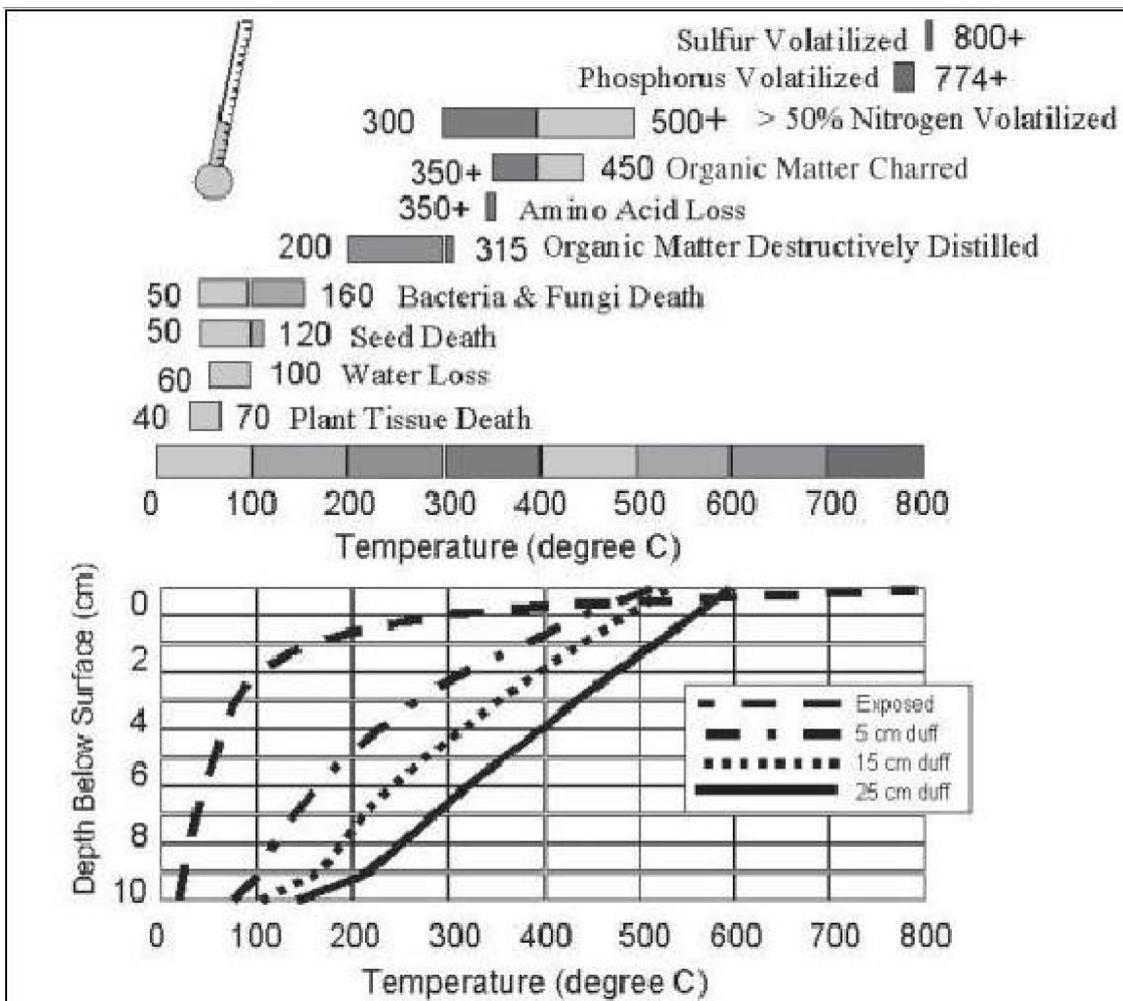


Figura 2. Rangos de temperatura asociados con varios efectos del fuego (superficie) comparado a la profundidad de penetración dentro del suelo mineral o para quema de la tierra en 5, 15 y 25 cm de hojarasca. Las condiciones son suelo seco grueso, que proporciona la mejor conducción (69)

2.2.3. Efecto de la temperatura sobre las propiedades del suelo

La distribución espacial de las propiedades del suelo dentro de un perfil de suelo determina, en gran extensión, la magnitud del cambio que se presenta en una propiedad particular del suelo durante un fuego. Por ejemplo, aquellas propiedades localizadas en, o cerca, a la superficie del suelo son probablemente más alteradas por el fuego debido a que están directamente expuestas a la superficie de calentamiento. Como resultado, el material orgánico y propiedades del suelo relacionadas son más probablemente cambiadas por la energía irradiada que otras propiedades, como contenido de arcilla, que frecuentemente se concentra en capas subsuperficiales donde está aislada de la superficie de calentamiento (68).

La sensibilidad de una propiedad particular del suelo al calentamiento también es importante. En general, los cambios en propiedades químicas del suelo están directamente relacionados a los cambios en la materia orgánica. Sin embargo, algunas propiedades físicas del suelo son también dependientes de la materia orgánica, mientras otras no lo son (por ejemplo, contenido de arcilla). Los microorganismos del suelo son probablemente más sensibles al calentamiento del suelo debido a que son organismos vivos que tienen bajos umbrales de temperatura letales (68).

2.2.3.1. Textura del suelo

La textura del suelo generalmente no experimenta cambios debajo de los 500 °C (48). Sin embargo, se han encontrado cambios significativos en suelos franco-arenosos en España y Australia, respectivamente, después de un fuego prescrito (49, 50); este reporte indica que el contenido de arena incrementó debido a la formación de agregados inestables. Aún, siete días después se observó que el contenido de arena retornó a niveles antes del fuego, de tal manera que estos cambios fueron efímeros (49). Se ha reportado una reducción de 39% en el contenido de arcilla en suelos franco-gruesos debido a la agregación de partículas finas en partículas de tamaño más grande (51).

Como contraste, también se ha observado, solo una pequeña reducción en el contenido de arcilla y mayores valores de arena contenido en suelos de textura gruesa localizados en el Oeste de los Estados Unidos después de un incendio forestal, pero no se hallaron cambios en textura en el lugar del fuego prescrito (52).

2.2.3.2. pH y conductividad eléctrica

Los valores de pH son probablemente altos debido a la pérdida de OH, la oxidación completa de la materia orgánica durante el fuego y la liberación de cationes en todos los tipos de fuego (53). Muchos autores han reportado el incremento de valores de pH después de un fuego prescrito (54, 55). También se ha reportado un incremento significativo en valores de pH después de un tratamiento de fuego prescrito realizado en un bosque húmedo en Australia durante 35 años (las parcelas fueron quemadas cada 2 y 4 años) (56).

Normalmente, los eventos de quema no cambiaron, los valores de pH fueron fuegos prescritos de baja intensidad y severidad aplicados periódicamente (cada dos años o más) o tratamientos simples realizados una vez anualmente. Sin embargo, los resultados dependen del pretratamiento del lugar. Eso fue lo que resultó en un trabajo de investigación, donde los valores de pH cambiaron en el tratamiento de árboles cortados, donde la quema fue aplicada directamente bajo árboles maduros en Canadá, mientras que estos no sucedieron en lugares donde las hojas superficiales fueron previamente colectadas en pilas antes de la quema (55).

La conductividad eléctrica tiende a incrementarse inmediatamente después del fuego prescrito (57), debido a que, en un incendio forestal, es normal la liberación de iones solubles durante la combustión de materia orgánica del suelo y la incorporación de cenizas (53). Sin embargo, los efectos a largo plazo no están claros: algunos autores reportan el incremento de la conductividad eléctrica después de 9 años de un fuego prescrito (57) y 23 años después de quemas anuales (54), mientras otros han encontrado una reducción de valores de conductividad eléctrica 12 años después de fuegos prescritos anuales y bianuales (58) debido a la exportación de nutrientes. Estas diferencias pueden ser atribuidas a la naturaleza del sitio de estudio, que incrementa la conductividad eléctrica en bosques y reduce los valores en praderas. Los ecosistemas no responden igual a las mismas prácticas de manejo como se observó en los valores de pH y conductividad eléctrica, de tal manera, que, reduciendo la frecuencia del fuego prescrito, podría mejorar la habilidad del suelo para retener y suministrar nutrientes después de una pérdida. Por esta razón, es importante más investigación acerca del comportamiento del pH y la conductividad eléctrica después de un fuego prescrito, de tal forma, que se pueda seleccionar la mejor manera de aplicar el manejo de la vegetación para reducir los efectos de daño al ambiente (59).

2.2.3.3. Materia orgánica

La combustión causa una disminución en el contenido de carbono orgánico del suelo, pero el impacto del fuego puede ser mucho más complejo dependiendo de la intensidad y procesos del suelo. Después de un fuego de baja

intensidad, el contenido de carbono orgánico puede incrementarse desde residuos de plantas parcialmente pirolizadas. Contrariamente, fuegos de media y alta intensidad causan una disminución en el contenido de carbono orgánico del suelo (60).

Más del 99% del contenido de materia orgánica puede ser destruido por el calentamiento del suelo a 450 °C durante dos horas o a 500 °C durante 30 minutos (61). Sin embargo, la pérdida de materia orgánica puede ser balanceada por contribuciones desde residuos parcialmente quemados y las hojas que se acumulan durante el día después del fuego (50).

La materia orgánica se concentra en la superficie del suelo mineral, donde es particularmente vulnerable a la erosión cuando la cubierta vegetal y las camas orgánicas son removidas por la quema. La relación C/N es alterada, incrementando con la temperatura. Los suelos afectados por el fuego muestran bajo contenido de materia orgánica libre, baja polimerización de ácidos fúlvicos e incrementan el contenido de ácidos húmicos y la proporción de huminas insolubles. Sin embargo, si el fuego se incrementa, el suelo puede convertirse en un medio inerte, conforme los residuos de plantas carbonizadas son muy difíciles de transformar (61).

Durante la combustión, la materia orgánica se somete a una serie de transformaciones físicas y químicas. Inicialmente, la humedad del suelo es vaporizada tan pronto como la temperatura alcanza los 100 °C. La lignina y la hemicelulosa se degradan a temperaturas entre 130 y 190 °C. Las reacciones que ocurren a temperaturas debajo de los 200 °C son endotérmicas (reacciones que requieren la absorción de calor). La descomposición de lignina y hemicelulosa se hace rápida a 200 °C con la celulosa, experimentando deshidratación química a los 280 °C. Casi el 35% de la pérdida de peso total ocurre antes que la materia orgánica alcance los 280 °C. Una vez que la temperatura del suelo excede los 280 °C, predominan las reacciones exotérmicas (aquellas reacciones que producen calor) y la materia orgánica es quemada. Cuando la temperatura en la superficie del suelo alcanza los 500 a 600 °C, ocurre combustión resplandeciente si es que el oxígeno no es excluido

de la superficie de carbón. Entonces, se produce una llama y la temperatura aumenta de 800 a 1000 °C. Sobre 1000 °C el carbono (C) es consumido en la superficie tan rápidamente como se produce carbón (68).

La mayor parte de la energía térmica liberada durante la combustión de materiales sobre el suelo se pierde hacia la atmósfera. Sin embargo, una cantidad significativa, pero menor es irradiada descendentemente y es absorbida por la superficie de *litter* cuando está presente, o por capas orgánicas, dependiendo de la cantidad y configuración de la materia orgánica depositada sobre el suelo superficial. El calor irradiado puede producir combustión secundaria del *litter*, y, en algunos casos, la capa de humus del suelo (68).

Las cantidades de *litter*, y humus quemados dependen de la duración e intensidad del flujo de calor que alcanza la capa de *litter*. La combustión de materiales sobre la superficie del suelo, y residuos, puede calentar significativamente la superficie del suelo mineral, y como resultado una cantidad substancial de calor puede ser transferida hacia el interior del suelo por conducción, convección, y por vaporización y condensación. Así, las temperaturas del suelo generadas durante el fuego varían considerablemente, dependiendo de la carga de combustible y las condiciones de quema. Si una gran cantidad de combustible está presente, las temperaturas del suelo pueden permanecer altas por varias horas y se esperaría que produzcan grandes cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas. En contraste, las temperaturas del suelo producidas durante fuegos de baja intensidad usadas por reducción de combustibles no producen apreciables cambios en la materia orgánica del suelo (68).

2.2.3.4. Capacidad de intercambio catiónico

El fuego afecta directamente la capacidad de intercambio catiónico (CIC) por la combustión de la materia orgánica del suelo y la transformación de los minerales de arcilla. Los materiales orgánicos son alterados a temperaturas entre 100 a 500 °C (61), mientras que los minerales son alterados a mucha más alta temperatura. Consecuentemente la CIC disminuye especialmente después del fuego en los primeros pocos centímetros de profundidad del suelo. Esta

disminución puede ser más o menos importante dependiendo de la intensidad del fuego, el contenido de materia orgánica antes del fuego, mineralogía del suelo y la proporción de arcilla (63).

El calentamiento del suelo durante el fuego puede afectar la capacidad de intercambio catiónico de dos maneras. El cambio más común es la destrucción de los compuestos del humus. La ubicación de la capa de humus en la superficie o cerca de ella, lo hace especialmente vulnerable a la destrucción parcial o total durante un fuego debido a que los materiales orgánicos y húmicos empiezan a descomponerse a casi 212 °F (100 °C) casi todos son completamente destruidos a 932 °F (500 °C). Estas temperaturas son fácilmente alcanzadas durante los fuegos forestales y quema de las tierras. Contrariamente, la capacidad de intercambio catiónico de los materiales de arcilla es más resistente al cambio debido al calentamiento y la deshidratación se presenta a temperaturas superiores a 752 °F (400 °C). La completa destrucción de materiales de arcilla se presenta a temperaturas entre 1292 a 1472 °F (700 a 800 °C). Además, el material de arcilla está raramente localizado en la superficie del suelo, pero sí está mayormente localizado a varios centímetros debajo de la superficie del suelo en el horizonte B donde está bien protegido del calentamiento superficial. En general, la reducción en la capacidad de intercambio como resultado del fuego es proporcional a la cantidad de capacidad total de cambio que es proporcionada por el componente orgánico (12). La cantidad de capacidad de intercambio catiónico remanente después de un fuego afecta la pérdida de lixiviación de nutrientes solubles liberados durante el fuego. Por ejemplo, la capacidad de intercambio catiónico antes del fuego de suelos arenosos puede consistir principalmente de sitios de intercambio hallados en la porción del humus del suelo. Si gran cantidad de humus es destruida en estos suelos arenosos durante la quema, entonces no hay mecanismos disponibles para prevenir las grandes pérdidas de nutrientes solubles por lixiviación (63).

2.2.3.5. Cationes cambiables

Los cationes encontrados en los suelos que son afectados por el fuego incluyen Ca, Mg, Na y K, y amonio (NH₄⁺), aunque estos cationes no son usualmente deficientes en la mayoría de los suelos con incendios forestales (64).

En la mayoría de los estudios se ha reportado un incremento significativo en la concentración de cationes del suelo después que se ha reportado una quema prescrita o un incendio forestal (65).

Los cationes monovalentes, como sodio y potasio, están presentes mayormente como cloruros y carbonatos, que son fácilmente movilizados (65). Los cationes divalentes, tales como calcio y magnesio, son menos móviles y están comúnmente presentes como óxidos y carbonatos. Puede presentarse la formación de carbonato de calcio insoluble, lo que limita la disponibilidad de fósforo después del fuego. Aunque estos cationes monovalentes y divalentes fácilmente disponibles probablemente no afecten directamente el crecimiento de la planta, su cantidad y composición determina la saturación de bases que juega un importante rol en controlar el régimen de pH en los suelos (12).

2.2.3.6. Fósforo

El fósforo se pierde a alta temperatura durante el calentamiento del suelo, en cantidades menores que el nitrógeno, y solo casi el 60% del fósforo total es perdido por transferencia no particulada cuando la materia orgánica es totalmente quemada (63). La combustión de la materia orgánica deja una cantidad relativamente grande de fósforo altamente disponible en las cenizas encontradas en la superficie del suelo inmediatamente después del fuego. Este fósforo es altamente disponible, sin embargo, puede ser rápidamente inmovilizado si las sustancias calcáreas están presentes en las cenizas y así hacerse no disponibles para el crecimiento de la planta (63).

La respuesta del fósforo disponible del suelo a la quema es variable y más difícil de predecir que otros nutrientes (66). El fósforo volatiliza a temperaturas de casi 1418 °F (770 °C). El proceso de esta volatilización del P no está bien comprendido. Los estudios realizados indican que solo hubo respuesta en el suelo superficial, y el fósforo no parece descender en el suelo vía volatilización y condensación.

La severidad del fuego afecta los cambios en el fósforo extractable. Durante los fuegos de alta severidad, el 50 al 60% del P total debería perderse

por volatilización (66). Parte de este fósforo volatilizado termina como un incremento de fósforo disponible en el suelo y en las cenizas después de la quema. Un extenso estudio de respuesta del P a diferentes severidades de quema fue reportado para bosques de eucalipto (67). Los lugares de estudio incluyeron quemado, no quemado y una cama de cenizas hallada bajo una pila de quema. Los mayores efectos ocurrieron en la superficie del suelo (0 - 1 pulgada; 0 – 2.5 cm), y las respuestas fueron dependientes de la severidad del fuego. Las concentraciones de P extractable incrementaron con el aumento de la severidad del fuego, pero la respuesta disminuyó con la profundidad. El fósforo orgánico, por otro lado, reaccionó opuestamente; las concentraciones fueron bajas en las áreas quemadas intensivamente y mayores en las áreas no quemadas y lugares quemados con baja severidad.

El fuego afectó la actividad enzimática y la mineralización del fósforo. Un estudio comparó esta respuesta del fósforo en una quema controlada versus un incendio forestal (26). Cuando las temperaturas alcanzadas en el piso forestal de la quema controlada fueron menores de 329 °F (50 °C), las concentraciones de fósforo extractable (ortofosfatos) no mostraron respuesta significativa. Contrariamente, un incendio forestal que produjo altas temperaturas en el suelo redujo la actividad de la fosfatasa e incrementó la mineralización del fósforo orgánico, lo que incrementó el fósforo en forma de ortofosfato y disminuyó el fósforo orgánico. Los experimentos de laboratorio mostraron que la actividad de la fosfatasa fue significativamente reducida cuando los suelos fueron calentados, pero estuvo ausente en suelos húmedos (63).

2.3. Definición de términos básicos

Fuego: el fuego es el resultado del proceso químico denominado combustión. La condición imprescindible para que se dé, es la presencia de una sustancia combustible a una temperatura suficientemente alta (llamada temperatura de ignición) para provocar la combustión, la presencia de oxígeno, para mantener la combustión, y una reacción en cadena. El fuego, si bien es de mucha utilidad, también puede ser el peor de los enemigos cuando se produce un incendio forestal (76).

Intensidad del fuego: la intensidad del fuego describe el proceso de combustión física de liberación de energía desde la materia orgánica. Representa la energía liberada varias fases del fuego y no la captura métrica simple de todos los aspectos relevantes de la energía del fuego (32).

Severidad de quema: término restringido a la pérdida de materia orgánica en o sobre la superficie del suelo (78).

Combustión: es un proceso fisicoquímico rápido, comúnmente llamado fuego, que libera la energía solar almacenada en forma química en diferentes combustibles como calor y una variedad de subproductos particulados y gaseosos (79).

Quema controlada: también llamada quema prescrita, es la aplicación controlada de fuego a acumulaciones de combustible, en su estado modificado o natural, en condiciones ambientales específicas que permiten confinar al fuego en un área predeterminada, y al mismo tiempo, para producir la intensidad de línea de fuego y tasa de difusión requerido para obtener los objetivos del manejo planeado (79).

Incendio forestal: fuego no deseado de cualquier origen, que no es estructural, que se propaga sin control en los recursos forestales, causando daños ecológicos, económicos y sociales (77).

Peligro: probabilidad de que un fenómeno físico, potencialmente dañino, de origen natural o inducido por la acción humana, se presenta en un lugar específico, con una cierta intensidad y en un periodo de tiempo y frecuencia definidos (77).

Vulnerabilidad: es la susceptibilidad de la población, la estructura física o las actividades socioeconómicas, de sufrir por acción de un peligro o amenaza (77).

Quemar: (i) un área quemada por incendios forestales, (ii) Una referencia a un fuego en funcionamiento, (iii) estar en llamas, (iv) Consumir combustible durante

la combustión rápida, (v) un incendio en curso o bajo investigación (80).

Celsius: de acuerdo a la Sociedad Meteorológica Americana, por convención, similar a la escala de temperatura en centígrados. La escala de temperatura centígrada es una escala con el punto de congelación a 0 grados y el punto de ebullición a 100 grados (80).

Clima: las condiciones meteorológicas predominantes o características de cualquier lugar o región, y sus extremos (80).

Suelo mineral: capas de suelo debajo de los horizontes orgánicos predominantes. Suelo con poco material combustible (80).

Materia orgánica del suelo: la fracción del suelo que incluye residuos de animales y plantas en diferentes estados de descomposición, células y tejidos de organismos del suelo, y sustancias sintetizadas por la población del suelo (80).

Oxidación: proceso durante el oxígeno se combina con otra sustancia (80).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Método y alcance de la investigación

3.1.1. Método de la investigación

3.1.1.1. Método general o teórico de la investigación

Se plantea el método general hipotético-deductivo, este método consiste en un procedimiento que parte de unas aseveraciones en calidad de hipótesis y busca refutar o falsear tales hipótesis, deduciendo de ellas conclusiones que deben confrontarse con los hechos (74).

Este método es ampliamente usado en la vida real como en la investigación científica. Consiste en generar hipótesis acerca de las posibles soluciones del planteamiento del problema y en su respectiva comprobación de estos a partir de los datos, si estos coinciden con ellos. La generación de las hipótesis plantea dos escenarios, cuando la investigación está más próxima al nivel observacional, que se podría decir, el nivel más simple, se formulan hipótesis del tipo empírico llevado a la experiencia y; el segundo escenario, cuando el sistema es más teórico se generan hipótesis del tipo abstracto (75).

Esta investigación presenta ambos escenarios, teniendo como premisa que una investigación no siempre es encasillada con un modelo único, sino debe buscar el mejor escenario para su nivel explicativo que pretenda conducirse. En ese ámbito la investigación parte desde un modelo observacional de la

problemática del fuego que experimenta un suelo y las altas temperaturas a la que es sometido (método observacional) para luego generar conclusiones a través de un procedimiento experimental generando posibles hipótesis (método teórico).

Esto no representa que la línea investigativa termine en este sentido, ya que este método tiene como naturaleza, llevar nuevamente a un razonamiento observacional planteando nuevas hipótesis, convirtiéndose así en una siguiente línea de investigación, abierta a nuevas hipótesis.

3.1.1.2. Método específico de la investigación

Se utilizó el método de análisis: las muestras de suelo de Sincos, que experimentaron temperaturas entre 0 °C y 400 °C fueron analizadas, antes y después, en sus propiedades fisicoquímicas: distribución del tamaño de partículas (textura), pH, contenido de carbonato de calcio (CaCO₃), conductividad eléctrica (CE), contenido de materia orgánica (MO), contenido de fósforo (P), contenido de potasio (K), capacidad de intercambio catiónico (CIC), cationes cambiabiles (Ca, Mg, Na, K) y relaciones catiónicas. Los análisis de suelo se presentan a continuación (70).

Tabla 2.
Análisis fisicoquímico del suelo

Determinación	Unidad	Método
Textura	-	Triángulo textural
Arena	%	Bouyoucos
Limo	%	Bouyoucos
Arcilla	%	Bouyoucos
Carbonato de calcio	%	Gasovolumétrico
pH	-	Potenciómetro (1:1 m:v)
Conductividad eléctrica	dS.cm ⁻¹	Conductómetro
Capacidad de intercambio catiónico	meq.100 g ⁻¹	NH ₄ OAc 1 N pH 7.0
Calcio cambiabile	meq.100 g ⁻¹	Absorción atómica
Magnesio cambiabile	meq.100 g ⁻¹	Absorción atómica
Potasio cambiabile	meq.100 g ⁻¹	Absorción atómica
Sodio cambiabile	meq.100 g ⁻¹	Absorción atómica
Fósforo disponible	ppm	Olsen modificado
Potasio disponible	ppm	Acetato de amonio
Materia orgánica	%	Walkley-Black

Tomada del Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes. UNALM, Lima

3.1.2. Alcances de la investigación

3.1.2.1. Tipo de investigación

La investigación es aplicada, pues se aplican las bases teóricas del efecto de la temperatura sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo.

En la tesis, la investigación es un estudio de tipo cuantitativo, se centra en aspectos observables y susceptibles de cuantificación, como son las propiedades del suelo. Este tipo de investigación implica la consideración de todos los conocimientos existentes y su profundización, en un intento de solucionar problemas específicos. Los resultados de la investigación aplicada se refieren, en primer lugar, a un único producto o a un número limitado de productos, operaciones, métodos o sistemas (71).

3.1.2.2. Nivel de investigación

La investigación es explicativa (71), porque el interés está en explicar de qué manera la variable independiente (la temperatura) influye en las variables dependientes (propiedades del suelo). Se tratará de explicar cómo la temperatura afecta las propiedades del suelo.

3.2. Tratamientos en estudio

Tabla 3.
Tratamientos en estudio

Tratamiento	Descripción	Repeticiones		
		I	II	III
T1	Suelo sometido a 0 °C	T1R1	T1R2	T1R3
T2	Suelo sometido a 100 °C	T2R1	T2R2	T2R3
T3	Suelo sometido a 200 °C	T3R1	T3R2	T3R3
T4	Suelo sometido a 300 °C	T4R1	T4R2	T4R3
T5	Suelo sometido a 400 °C	T5R1	T5R2	T5R3

Los tratamientos de temperatura se propusieron con base en los datos reportados en trabajos de investigación asociados con el fuego de incendios forestales y en la capa superficial de los suelos (69). Es importante precisar cuándo se evalúa el efecto del fuego sobre las propiedades del suelo, un carácter importante es la temperatura a la que los nutrientes son volatilizados o qué daño irreversible ocurre a una propiedad particular del suelo. Esta temperatura es llamada umbral de temperatura (12).

Los rangos de temperatura donde las propiedades del suelo cambian en respuesta al calentamiento del suelo, se clasifican en tres:

- Propiedades poco cambiantes, hasta que la temperatura haya alcanzado 450 °C. Incluye arcillas, calcio, magnesio, potasio y minerales como manganeso.
- Propiedades moderadamente sensitivas, cambian a temperaturas entre 100 y 400 °C. Incluye azufre, materia orgánica y propiedades del suelo dependientes de la materia orgánica.
- Propiedades sensitivas, cambian a temperaturas menores a 100 °C, por ejemplo, microorganismos vivos, raíces de plantas y semillas (63).

3.3. Diseño de investigación

Se utilizó el diseño experimental Completamente al Azar (DCA), cuyo modelo aditivo lineal es el siguiente:

$$\gamma_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

γ_{ij} = cualquier observación del experimento

μ = media poblacional

τ_i = efecto del i - ésimo tratamiento

ε_{ij} = error experimental



Figura 3. Diagrama de flujo del proceso experimental

3.4. Población y muestra

3.4.1. Población

La población estuvo constituida por suelos agrícolas sometidos normalmente después de cada campaña agrícola a la quema de los restos de cosecha, especialmente los cereales, como parte de una labor agrícola para preparar el terreno para la próxima siembra.

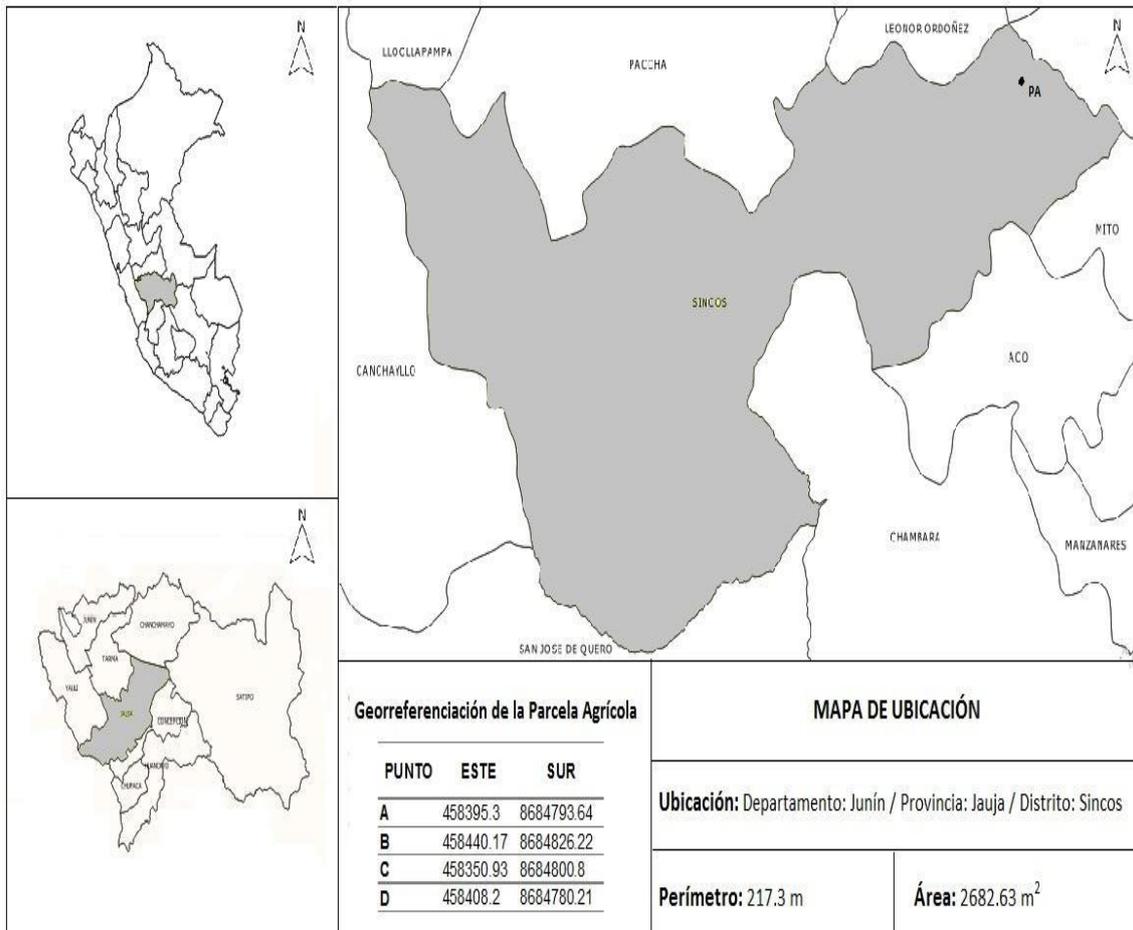


Figura 4. Ubicación de la parcela agrícola. Sincos, Jauja

3.4.2. Muestra

La muestra de suelo fue obtenida de una parcela agrícola, después de la cosecha de cereales (trigo), en la parte alta del distrito de Sincos. La muestra fue de tipo compuesta (73), resultado de la mezcla de 16 muestras simples del terreno agrícola, de la primera capa o capa superficial (capa arable) cuya profundidad promedio es de 20 cm, mediante un muestreo sistemático, recogiendo un total de 5 kg de suelo aproximadamente.

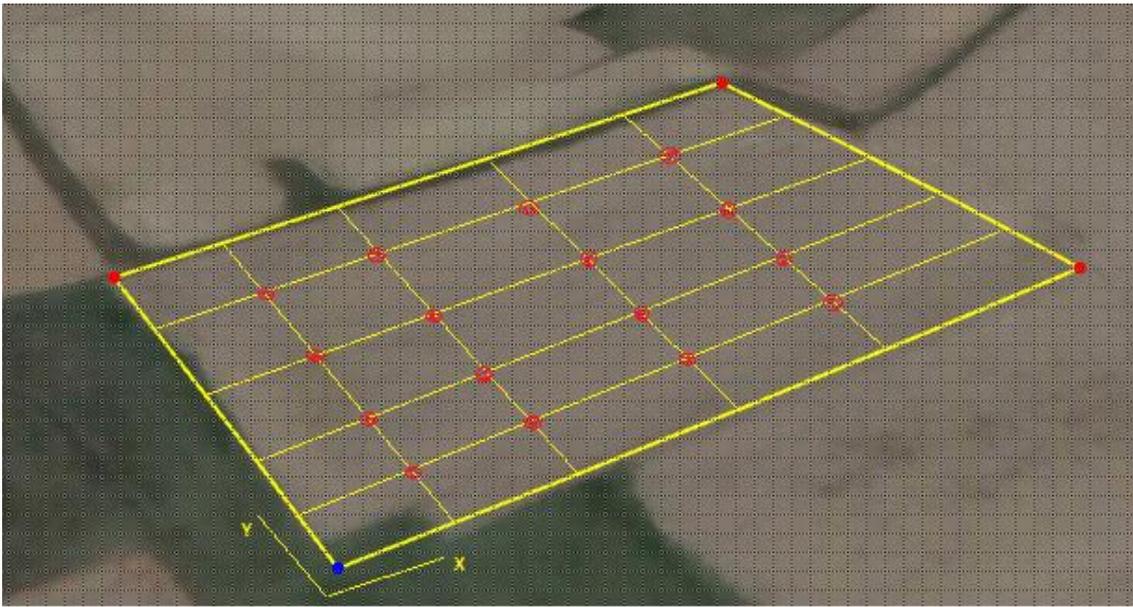


Figura 5. Modelo de muestreo sistemático

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.5.1. Técnicas

Las muestras de suelo fueron sometidas a diferentes temperaturas (200, 300, 400 °C) en un horno - mufla, en una masa de 200 g cada uno, con tres repeticiones, se dejaron enfriar, se embolsaron, utilizando bolsas de polietileno hermética, se etiquetaron y fueron enviadas al Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, para el análisis de caracterización de cada muestra de suelo, que se constituye en unidad experimental.

3.5.2. Instrumentos utilizados en la recolección de datos

Para los análisis de suelos realizados en cada muestra, se siguieron los métodos y procedimientos estándar establecidos. Las determinaciones, unidades y métodos están resumidas en la tabla 2.

3.6. Técnicas de procesamiento de datos

Al finalizar el experimento, los datos de los análisis de suelo fueron procesados, primero se desarrolló el análisis de la distribución normal de los datos, ejecutando la prueba de normalidad de Shapiro – Wilks; si salió significativa ($p < 0.05$) se realizó el análisis de varianza de los datos y la prueba de comparación múltiple de Duncan; si no salió significativa ($p < 0,05$), se aplicó la prueba no paramétrica de medias de Kruskal-Wallis.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados del tratamiento y análisis de la información

Se presentan a continuación los resultados del análisis de suelos en sus propiedades fisicoquímicas para determinar el efecto de las diferentes temperaturas a las que fueron sometidos.

4.1.1. Propiedades físicas del suelo

4.1.1.1. Contenido de arena (%)

El contenido de arena en el suelo sometido a quema a crecientes temperaturas tuvo un incremento desde 42% (0 °C) hasta 49% a (400 °C) (4).

Para establecer el tipo de estadística a utilizar (paramétrico y no paramétrico) se realizó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilks (tabla 5), en este caso no hay evidencias para rechazar el supuesto de distribución normal ($p > 0.05$). Se acepta H_0 , es decir, las observaciones tienen distribución normal.

Para conocer el efecto de la temperatura en el % de arena se realizó la prueba de Duncan, donde los valores obtenidos del análisis de arena al final del experimento demuestran que existe un incremento del % de arena en el tratamiento N.º 5 (400 °C), el que sobresale, con un promedio de 49% (tabla 7). Esto se debe a las alteraciones sufridas por la temperatura en las partículas de arcilla.

Se utilizó esta prueba debido a que aún sin ser significativa la prueba de Anova (tabla 6) puede llevarse a cabo.

Tabla 4.
Resultados del análisis de arena al final del experimento

N.º Tratamiento	Repetición	Tratamiento (T °C)	Arena (%)
1	1	0	43
1	2	0	43
1	3	0	41
Promedio	-	-	42
2	1	100	47
2	2	100	47
2	3	100	47
Promedio	-	-	47
3	1	200	47
3	2	200	45
3	3	200	45
Promedio	-	-	46
4	1	300	49
4	2	300	47
4	3	300	45
Promedio	-	-	47
5	1	400	43
5	2	400	55
5	3	400	49
Promedio	-	-	49

Tomada del Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes. UNALM, Lima.

Tabla 5.
Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el contenido de arena (%) del suelo

Variable	n	Media (%)	D. E.	W	p
Arena	15	46.20	3.6	0.92	0.356

Tabla 6.
Análisis de varianza en el contenido de arena del suelo sometido a diferentes temperaturas

F. V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Tratamiento	73.067	4	18.267	2.141	0.150
Error	85.333	10	8.533		
Total	158.400	14			

Tabla 7.
Prueba de Duncan para contenido de arena del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas

O. M.	Tratamiento (°C)	Promedio de arena (%)	Significación
1	400	49	a
2	300	47	a b
3	100	47	a b
4	200	46	a b
5	0	42	b

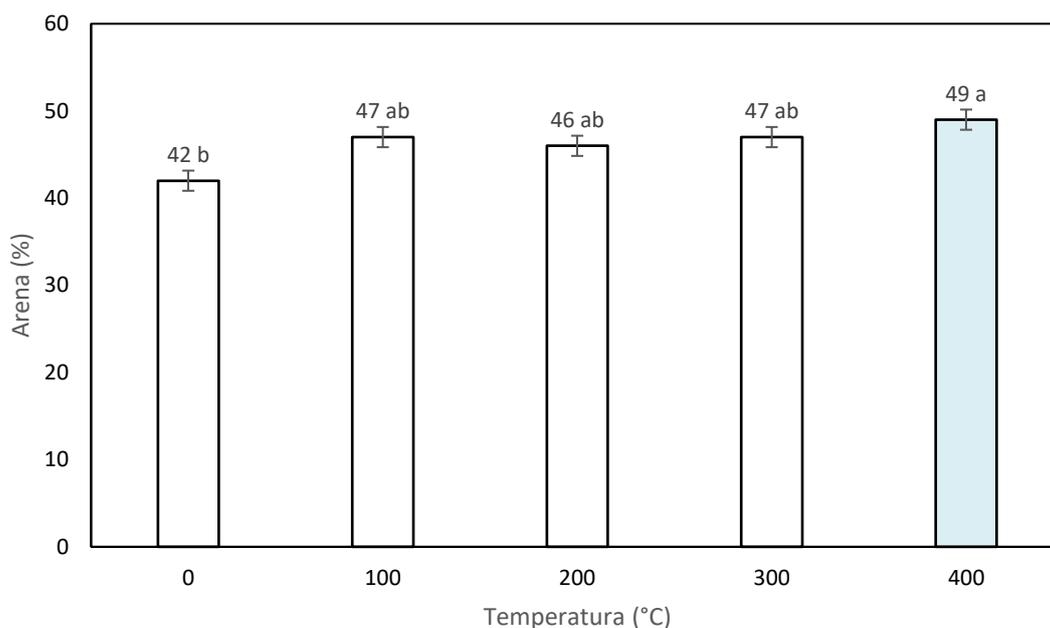


Figura 6. Variación del contenido de arena del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico

4.1.1.2. Contenido de limo (%)

El contenido de las partículas de limo no tiene variación en el suelo debido al incremento de temperatura, y tuvo valores promedio de 31% a 0 °C a 31% a 400 °C (8).

Para establecer el tipo de estadístico a utilizar (paramétrico y no paramétrico) se realizó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilks (tabla 9), en este caso hay evidencias para rechazar el supuesto de distribución normal ($p < 0,05$). Se rechaza H_0 , se acepta H_a : las observaciones no tienen distribución normal.

Para conocer el efecto de la temperatura en el % de limo se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis (tabla 10), la que no evidenció diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos. Estos resultados se deben a la naturaleza mineralógica de las partículas de limo, constituidas de cuarzo y minerales secundarios que solo a temperaturas extremas, superiores a 1200 °C podrían presentar modificaciones.

Tabla 8.**Resultados del análisis de limo al final del experimento. Suelo de Sincos**

N.º Tratamiento	Repetición	Tratamiento (T °C)	Limo (;%)
1	1	0	30
1	2	0	30
1	3	0	32
Promedio	-	-	31
2	1	100	28
2	2	100	28
2	3	100	28
Promedio	-	-	28
3	1	200	30
3	2	200	30
3	3	200	30
Promedio	-	-	30
4	1	300	32
4	2	300	28
4	3	300	34
Promedio	-	-	31
5	1	400	36
5	2	400	28
5	3	400	29
Promedio	-	-	31

Tomada del Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes. UNALM, Lima

Tabla 9.**Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro - Wilks para el contenido de limo**

Variable	n	Media (%)	D. E.	W	P
Limo	15	30	2.396	0.826	0.009

Tabla 10.**Prueba de Kruskal-Wallis para contenido de limo del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas**

OM	Tratamiento	Promedio de limo (%)	Significación
1	300 °C	31	a
2	400 °C	31	a
3	0 °C	31	a
4	200 °C	30	a
5	100 °C	28	a

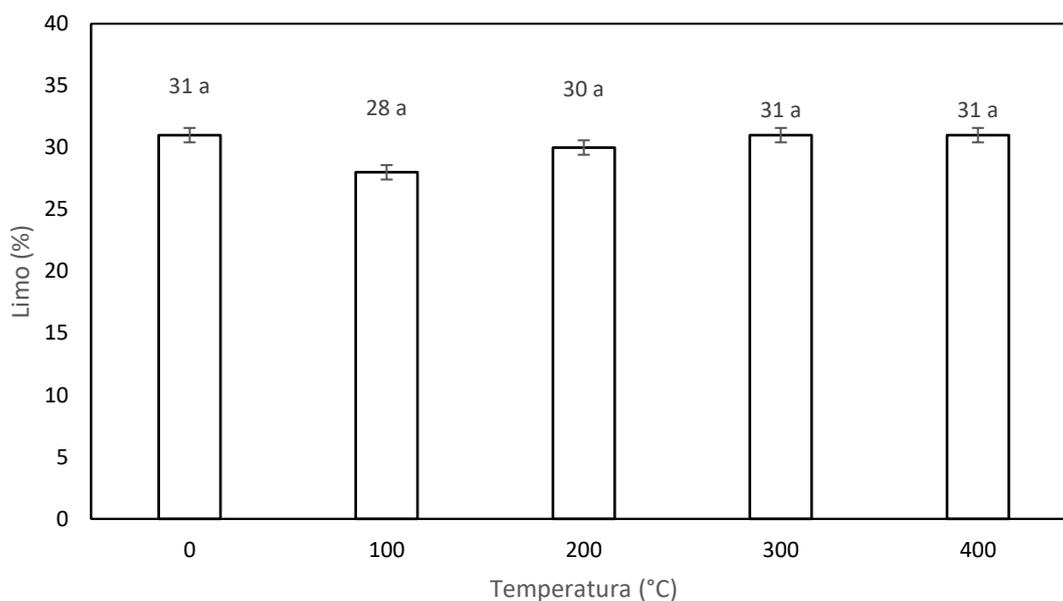


Figura 7. Variación del contenido de limo del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico

4.1.1.3. Contenido de arcilla (%)

El contenido de arcilla del suelo de Sincos tiene una disminución debido al incremento de temperatura al que fue sometido, alcanzando un promedio de 27% a 0 °C y 20% a 400 °C (11).

Para establecer el tipo de estadística a utilizar (paramétrico y no paramétrico) se realizó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilks (tabla 12), en este caso no hay evidencias para rechazar el supuesto de distribución normal ($p > 0.05$). Se acepta H_0 , es decir, las observaciones tienen distribución normal.

El análisis de varianza presenta un p-valor inferior al nivel de significación ($\alpha = 0.05$), indicando que los tratamientos son diferentes estadísticamente (13).

La prueba de Duncan (tabla 14) presenta como sobresaliente al tratamiento de 0 °C con el valor más alto de arcilla, sin diferencias significativas con los tratamientos de 100 °C y 200 °C, pero superiores a los tratamientos con 300 °C y 400 °C. Esto se debe a la mayor alteración que experimentan las partículas de arcillas, compuestas mayormente de minerales secundarios, cuando se les somete a altas temperaturas, y que son recubiertas de partículas de arena, por eso se observó mayor porcentaje de arena.

Tabla 11.**Resultados del análisis de arcilla al final del experimento. Suelo de Sincos**

N.º Tratamiento	Repetición	Tratamiento (T °C)	Arcilla (%)
1	1	0	27
1	2	0	27
1	3	0	27
Promedio	-	-	27
2	1	100	25
2	2	100	25
2	3	100	25
Promedio	-	-	25
3	1	200	23
3	2	200	25
3	3	200	25
Promedio	-	-	24
4	1	300	19
4	2	300	25
4	3	300	21
Promedio	-	-	22
5	1	400	21
5	2	400	17
5	3	400	22
Promedio	-	-	20

Tomada del Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes. UNALM, Lima

Tabla 12.**Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro - Wilks para el contenido de arcilla del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas**

Variable	n	Media	D. E.	W	P
Arcilla	15	23.600	3.019	0.867	0.054

Tabla 13.**Análisis de varianza del contenido de arcilla del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas**

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Tratamiento	92.267	4	23.067	6.528	0.008
Error	35.333	10	3.533		
Total	127.600	14			

Tabla 14.**Prueba de Duncan para contenido de arcilla del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas**

OM	Tratamiento (°C)	Promedio de arcilla (%)	Significación
1	0 °C	27	a
2	100 °C	25	a b
3	200 °C	24	a b
4	300 °C	22	b c
5	400 °C	20	c

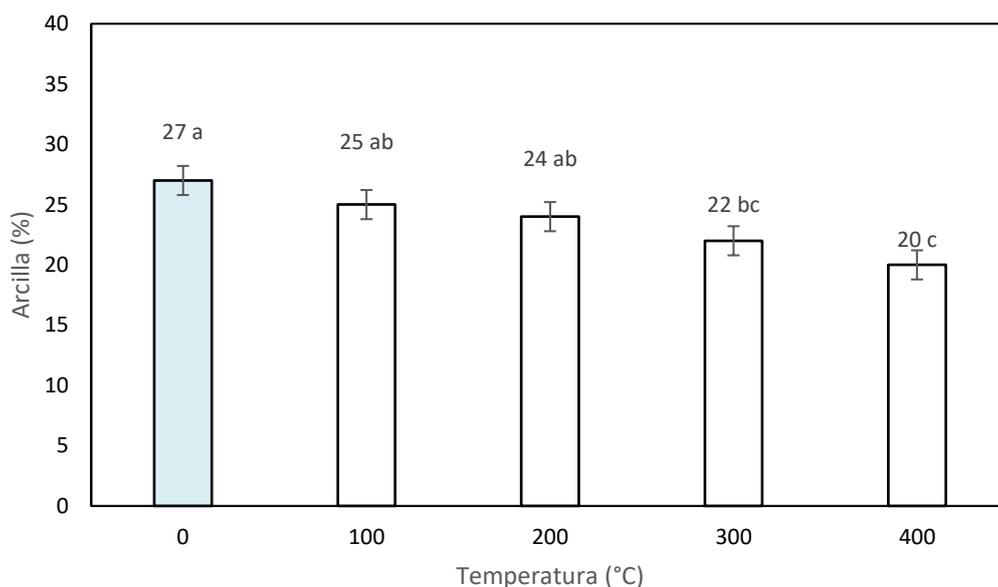


Figura 8. Variación del contenido de arcilla del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico

4.1.2. Propiedades químicas del suelo

4.1.2.1. pH

El pH se incrementó debido al aumento de temperatura al que fue sometido el suelo, siendo el promedio a 0 °C de 6.29 y a 400 °C de 7.47 (16).

La prueba de Kruskal-Wallis presenta al tratamiento de 200 °C como sobresaliente, sin diferencias significativas con los tratamientos de 100 °C y 0 °C, pero superiores estadísticamente a los tratamientos de 300 °C y 400 °C (17 y 9).

Tabla 15.**Resultados del análisis de pH al final del experimento. Suelo de Sincos**

N.º Tratamiento	Repetición	Tratamiento (T °C)	pH
1	1	0	6.48
1	2	0	6.18
1	3	0	6.22
Promedio	-	-	6.29
2	1	100	6.22
2	2	100	6.22
2	3	100	6.27
Promedio	-	-	6.24
3	1	200	6.18
3	2	200	6.02
3	3	200	6.11
Promedio	-	-	6.10
4	1	300	6.75
4	2	300	6.28
4	3	300	6.62
Promedio	-	-	6.55
5	1	400	7.05
5	2	400	8.96
5	3	400	6.41
Promedio	-	-	7.47

Tomada del Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes. UNALM, Lima

Tabla 16.**Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro Wilks para pH del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas**

Variable	n	Media	D.E.	W	p
pH	15	6.531	0.724	0.635	< 0.0001

En este caso hay evidencias para rechazar el supuesto de distribución normal ($p < 0,05$). Se rechaza H_0 , se acepta H_a : las observaciones no tienen distribución normal.

Tabla 17.**Prueba de Kruskal-Wallis para pH del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas**

OM	Tratamiento	Promedio pH	Significación
1	200 °C	6.10	a
2	100 °C	6.24	a b
3	0 °C	6.29	a b
4	300 °C	6.55	b
5	400 °C	7.47	b

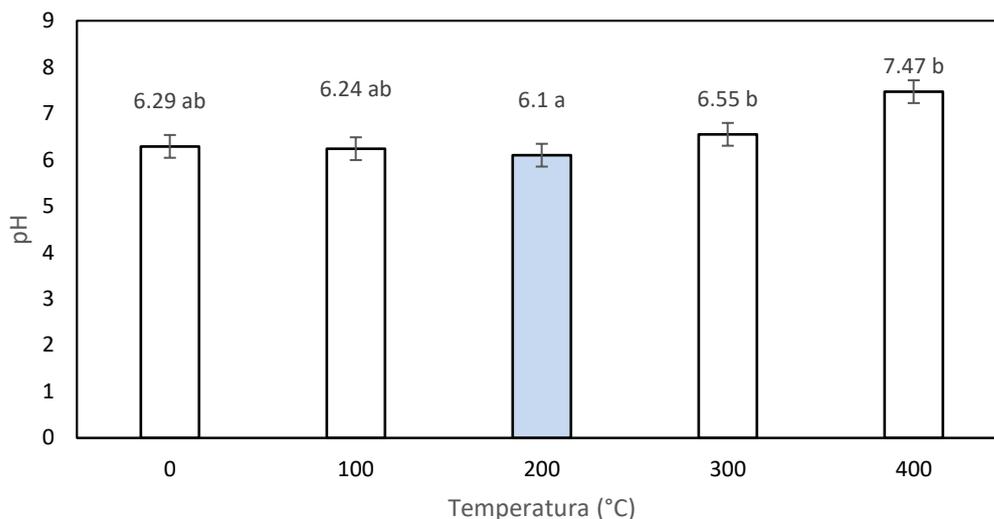


Figura 9. Variación del pH del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico

4.1.2.2 Conductividad eléctrica (CE) del suelo

La conductividad eléctrica, que indica el contenido de sales de un suelo, se incrementó con el aumento de temperatura, siendo el promedio de $0,60 \text{ dS.m}^{-1}$ a $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y $1,26 \text{ dS.m}^{-1}$ a $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (18).

La prueba de Kruskal-Wallis presenta como sobresalientes a los tratamientos de $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ con el valor promedio de 0.603 para ambos tratamientos, sin diferencias significativas con los tratamientos de $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$, pero superiores estadísticamente al tratamiento con $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ que tuvo el más alto valor de CE (1.753 dS.m^{-1}); estos resultados se atribuyen a la disolución de las sales debido a las altas temperaturas. Todos los valores se encuentran en el rango de baja CE (20 y 10).

Tabla 18.

Resultados del análisis de la CE al final del experimento. Suelo de Sincos

Trata	Repetición	Tratamiento (T °C)	CE (dS.m ⁻¹)
1	1	0	0.66
1	2	0	0.58
1	3	0	0.57
Promedio	-	-	0.60
2	1	100	0.60
2	2	100	0.64
2	3	100	0.57
Promedio	-	-	0.60
3	1	200	1.17
3	2	200	1.08
3	3	200	0.84
Promedio	-	-	1.03
4	1	300	1.70
4	2	300	1.84
4	3	300	1.72
Promedio	-	-	1.75
5	1	400	1.46
5	2	400	1.67
5	3	400	0.64
Promedio	-	-	1.26

Tomada del Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes. UNALM, Lima

Tabla 19.

Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro – Wilks para la CE del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas

Variable	n	Media	D.E.	W	p
CE (dS.m ⁻¹)	15	1.049	0.499	0.779	0.001

En este caso hay evidencias para rechazar el supuesto de distribución normal ($p < 0,05$). Se rechaza H_0 , se acepta H_a : las observaciones no tienen distribución normal.

Tabla 20.

Prueba de Kruskal-Wallis para la CE del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas

O. M.	Tratamiento	Promedio CE (dS.m ⁻¹)	Significación
1	100°C	0.603	a
2	0°C	0.603	a
3	200°C	1.030	a b
4	400°C	1.257	a b
5	300° C	1.753	b

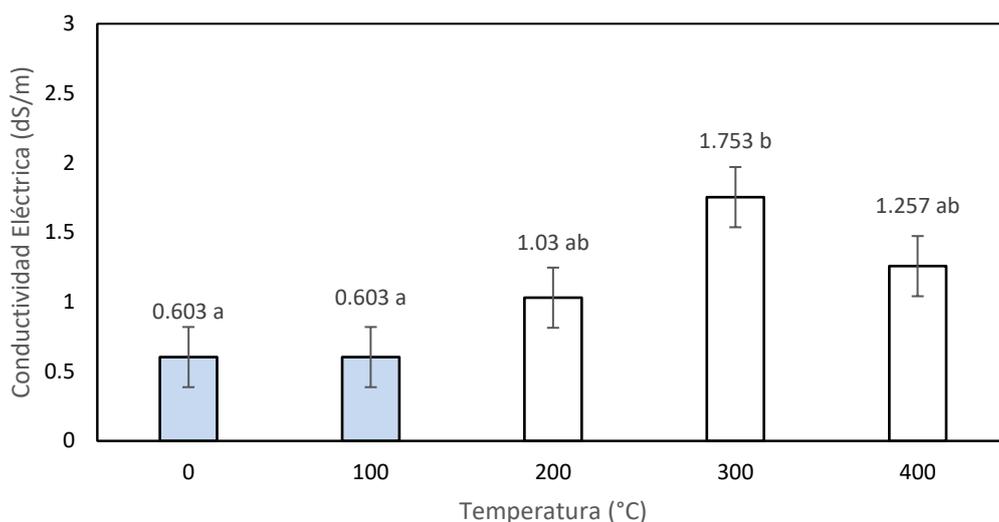


Figura 10. Variación de la Conductividad Eléctrica (CE) del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico

4.1.2.3. Materia orgánica del suelo (MOS)

El contenido de materia orgánica disminuyó en el suelo de Sincos, debido al incremento de temperatura, siendo el promedio a 0 °C de 1.87% y de 0.76% a 400 °C (21).

La prueba de Kruskal-Wallis presenta al tratamiento de 100 °C como sobresaliente con un promedio de 1.973 % MO, considerado bajo, sin diferencias significativas con los tratamientos de 200 °C y 0 °C, pero superiores estadísticamente a los tratamientos de 300 °C y 400 °C, que alcanzaron valores de 1.167% y 0.760%, respectivamente. Estos resultados se pueden atribuir a la oxidación de la materia orgánica debido a las altas temperaturas a que fue sometido el suelo (23 y 11).

Tabla 21.

Resultados del análisis de la MOS al final del experimento. Suelo de Sincos

N.º Tratamiento	Repetición	Tratamiento (°C)	MOS (%)
1	1	0	1.84
1	2	0	1.93
1	3	0	1.84
Promedio	-	-	1.87
2	1	100	1.90
2	2	100	2.05
2	3	100	1.97
Promedio	-	-	1.97
3	1	200	1.93
3	2	200	1.93
3	3	200	1.83
Promedio	-	-	1.90
4	1	300	0.98
4	2	300	1.26
4	3	300	1.26
Promedio	-	-	1.17
5	1	400	0.69
5	2	400	1.25
5	3	400	0.34
Promedio	-	-	0.76

Tomada del Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes. UNALM, Lima

Tabla 22.

Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro - Wilks para la MOS del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas

Variable	n	Media	D.E.	W	p
MOS (%)	15	1.533	0.535	0.805	0.004

En este caso hay evidencias para rechazar el supuesto de distribución normal ($p < 0,05$). Se rechaza H_0 , se acepta H_a : las observaciones no tienen distribución normal.

Tabla 23.

Prueba de Kruskal-Wallis para la MOS del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas

OM	Tratamiento	Promedio MO (%)	Significación
1	100 °C	1.973	a
2	200 °C	1.897	a b
3	0 °C	1.870	a b
4	300 °C	1.167	b c
5	400 °C	0.760	c

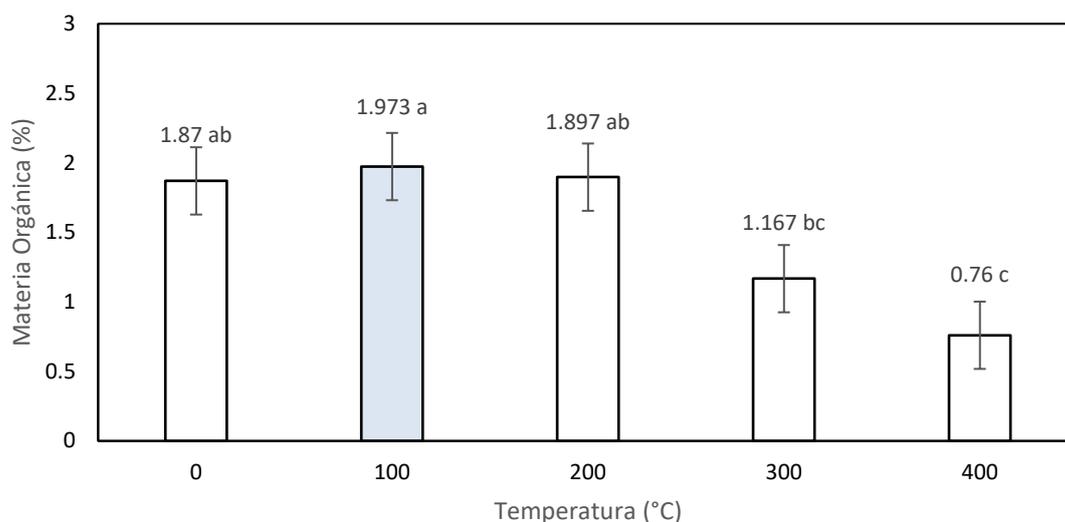


Figura 11. Variación de la materia orgánica del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico

4.1.2.4. Fósforo disponible del suelo (PDS)

El fósforo disponible del suelo se incrementó en el suelo de Sincos, cuando fue sometido a temperaturas crecientes (24).

La prueba de Kruskal-Wallis muestra a los tratamientos de 400 °C y 300 °C como sobresalientes, sin diferencias significativas con el tratamiento de 200 °C, pero superiores estadísticamente a los tratamientos de 100 °C y 0 °C. Estos resultados se atribuyen a la oxidación de la materia orgánica, que libera fósforo disponible al suelo (26 y 12).

Tabla 24.**Resultados del análisis del PDS al final del experimento. Suelo de Sincos**

N.º	Repetición	Tratamiento (T °C)	PDS (ppm)
1	1	0	10.04
1	2	0	10.60
1	3	0	10.30
Promedio	-	-	10.31
2	1	100	12.30
2	2	100	11.60
2	3	100	10.10
Promedio	-	-	11.33
3	1	200	26.50
3	2	200	22.90
3	3	200	24.40
Promedio	-	-	24.60
4	1	300	68.40
4	2	300	59.30
4	3	300	69.20
Promedio	-	-	65.63
5	1	400	68.00
5	2	400	61.70
5	3	400	28.00
Promedio	-	-	52.57

Tomada del Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes. UNALM, Lima

Tabla 25.**Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro - Wilks para el PDS del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas**

Variable	n	Media	D.E.	W*	p
PDS (ppm)	15	32.89	24,64	0,742	<0,0001

En este caso hay evidencias para rechazar el supuesto de distribución normal ($p < 0,05$). Se rechaza H_0 , se acepta H_a : las observaciones no tienen distribución normal.

Tabla 26.**Prueba de Kruskal-Wallis para el PDS de Sincos sometido a diferentes temperaturas**

O. M.	Tratamiento	Promedio (ppm)	Significación
1	400	65.63	a
2	300	52.57	a
3	200	24.60	a b
4	100	11.33	b
5	0	10.31	b

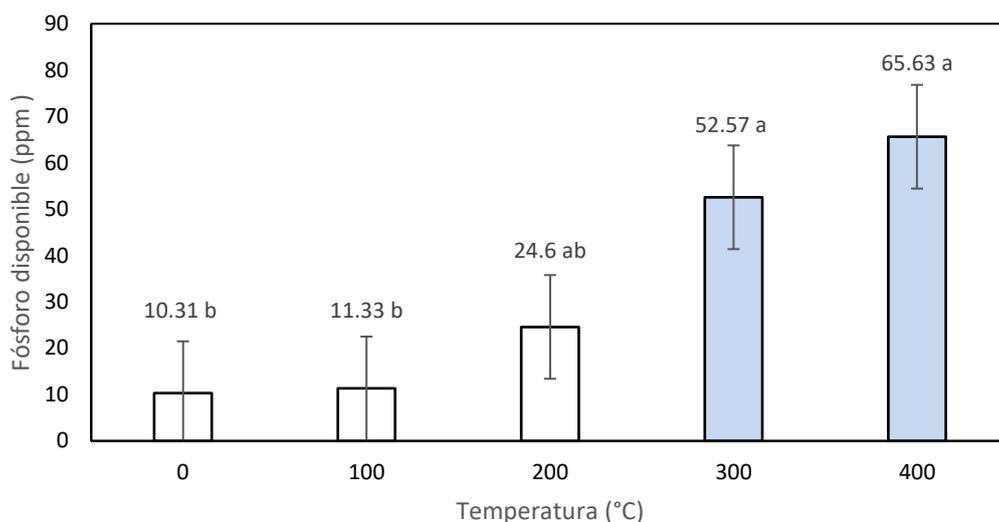


Figura 12. Variación del fósforo disponible del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico

4.1.2.5. Potasio disponible del suelo (KDS)

El potasio disponible se incrementó en el suelo de Sincos, de 162 ppm a 210 ppm en los tratamientos con 0 °C y 400 °C respectivamente (27).

El análisis de varianza presenta en la fuente de tratamientos un p-valor de 0.003, inferior al nivel de significación ($\alpha = 0.05$), indicando que los tratamientos son diferentes estadísticamente.

La prueba de significación de Duncan presenta a los tratamientos de 400 °C y 300 °C en los primeros lugares en orden de mérito sin diferencias estadísticas entre sí, y superiores significativamente en contenido de potasio disponible los tratamientos de 200 °C, 0 °C y 100 °C. Esto se puede atribuir al efecto del incremento de temperatura en la alteración de minerales del suelo, lo que libera potasio disponible al suelo (30 y 13).

Tabla 27.**Resultados del análisis del KDS al final del experimento. Suelo de Sincos**

N.º Tratamiento	Repetición	Tratamiento (T °C)	KDS (ppm)
1	1	0	158
1	2	0	163
1	3	0	165
Promedio	-	-	162
2	1	100	152
2	2	100	153
2	3	100	152
Promedio	-	-	152
3	1	200	174
3	2	200	176
3	3	200	174
Promedio	-	-	175
4	1	300	206
4	2	300	198
4	3	300	202
Promedio	-	-	202
5	1	400	235
5	2	400	222
5	3	400	173
Promedio	-	-	210

Tomada del Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes. UNALM, Lima

Tabla 28.**Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro - Wilks para el KDS de Sincos sometido a diferentes temperaturas**

Variable	n	Media	D. E.	W	p
KDS (ppm)	15	180.200	26.328	0.868	0.0566

En este caso no hay evidencias para rechazar el supuesto de distribución normal ($p > 0,05$). Se acepta H_0 , se rechaza H_a : las observaciones tienen distribución normal.

Tabla 29.**Análisis de varianza del contenido de KDS del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas**

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Tratamiento	7 506.067	4	1 876.267	8.531	0.003
Error	2 199.333	10	219.933		
Total	9 704.400	14			

Tabla 30.**Prueba de Duncan para el KDS de Sincos sometido a diferentes temperaturas.**

O. M.	Tratamiento (°C)	Promedio (ppm)	Significación
1	400	210.00	a
2	300	202.00	a
3	200	174.67	b
4	0	162.00	b
5	100	152.33	b

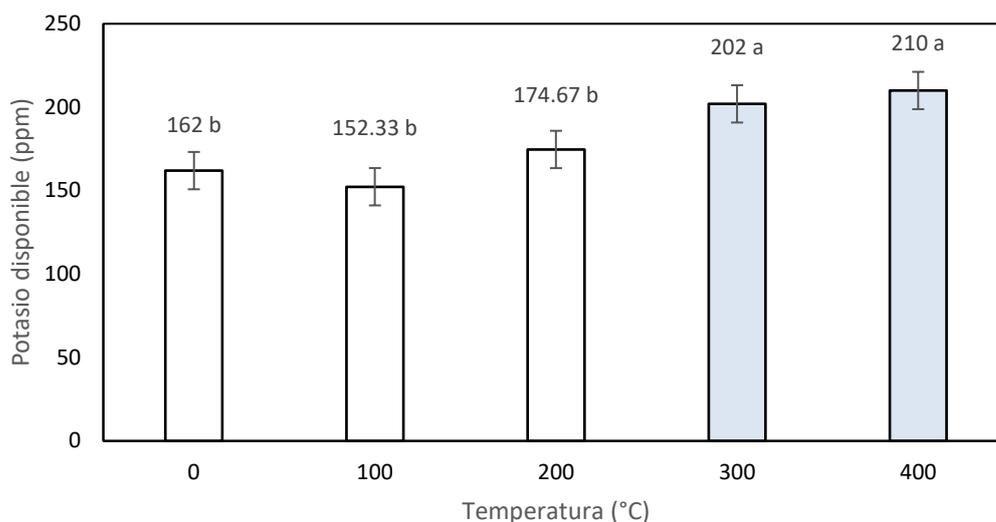


Figura 13. Variación del potasio disponible del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico

4.1.2.6. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) del suelo

La CIC del suelo disminuyó con el incremento de temperatura a que fue sometido el suelo, siendo el promedio de 13.547 ppm a 0 °C y 9.333 ppm a 400 °C (31).

El análisis de varianza presenta en la fuente de tratamientos un p-valor inferior al nivel de significación ($\alpha = 0.05$), indicando que los tratamientos son diferentes estadísticamente (33).

La prueba de Duncan presenta al tratamiento de 0 °C como sobresaliente, sin diferencias significativas con los tratamientos de 100 °C y 200 °C, pero significativamente superiores a los tratamientos de 300 °C y 400 °C, que tuvieron los valores más bajos de CIC (34 y 14).

Tabla 31.**Resultados del análisis de la CIC al final del experimento. Suelo de Sincos**

N.º Tratamiento	Repetición	Tratamiento (T °C)	CIC (meq.100 g ⁻¹)
1	1	0	14.08
1	2	0	12.80
1	3	0	13.76
Promedio	-	-	13.55
2	1	100	13.12
2	2	100	12.80
2	3	100	13.12
Promedio	-	-	13.01
3	1	200	12.32
3	2	200	13.28
3	3	200	12.80
Promedio	-	-	12.80
4	1	300	11.20
4	2	300	12.00
4	3	300	10.88
Promedio	-	-	11.36
5	1	400	11.20
5	2	400	9.60
5	3	400	7.20
Promedio	-	-	9.33

Tomada del Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes. UNALM, Lima

Tabla 32.**Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro Wilks para la CIC del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas**

Variable	n	Media	D. E.	W	p
CIC (meq.100 g ⁻¹)	15	12.011	1.791	0.869	0.059

En este caso no hay evidencias para rechazar el supuesto de distribución normal ($p > 0,05$). Se acepta H_0 , se rechaza H_a : las observaciones tienen distribución normal.

Tabla 33.**Análisis de varianza del contenido de la CIC del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas**

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Tratamiento	34.737	4	8.684	8.523	0.003
Error	10.189	10	1.019		
Total	44.926	14			

Tabla 34.

Prueba de Duncan para la CIC del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas

O.M.	Tratamiento (°C)	Promedio de CIC (meq.100 g ⁻¹)	Significación
1	0	13.547	a
2	100	13.013	a b
3	200	12.800	a b
4	300	11.360	b
5	400	9.333	c

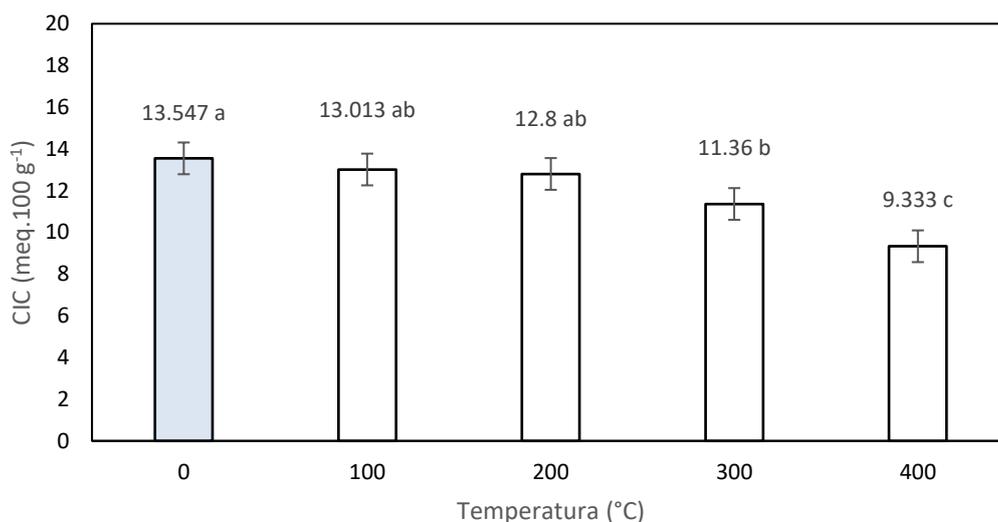


Figura 14. Variación de la capacidad de intercambio catiónico del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico

4.1.2.7. Calcio cambiante (Cax) del suelo

El contenido de calcio cambiante disminuye en el suelo al incrementarse las temperaturas, siendo 8.98 meq.100 g⁻¹ a 0 °C y 6.24 meq.100 g⁻¹ a los 400 °C (35).

El análisis de varianza presenta un p-valor inferior al nivel de significación ($\alpha = 0.05$) en la fuente de tratamientos, lo que indica que los tratamientos son diferentes estadísticamente (37).

La prueba de Duncan muestra al tratamiento de 100 °C como sobresaliente, sin diferencias significativas con los tratamientos de 0 °C y 200 °C, pero superiores a los tratamientos de 300 °C y 400 °C, esto se debe a la disminución de la cantidad de intercambiadores, que son la materia orgánica y la arcilla, ocasionando menor cantidad de calcio cambiante (38 y 15).

Tabla 35.**Resultados del análisis del Cax al final del experimento. Suelo de Sincos**

N.º Tratamiento	Repetición	Tratamiento (°C)	Cax (meq.100 g ⁻¹)
1	1	0	9.86
1	2	0	8.28
1	3	0	8.76
Promedio	-	-	8.97
2	1	100	8.80
2	2	100	9.01
2	3	100	9.24
Promedio	-	-	9.02
3	1	200	9.29
3	2	200	8.63
3	3	200	8.90
Promedio	-	-	8.94
4	1	300	7.76
4	2	300	7.43
4	3	300	7.52
Promedio	-	-	7.57
5	1	400	7.26
5	2	400	6.81
5	3	400	4.65
Promedio	-	-	6.24

Tomada del Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas y Fertilizantes. UNALM, Lima

Tabla 36.**Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro Wilks para el Cax del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas**

Variable	n	Media	D.E.	W	p
Cax (meq.100 g ⁻¹)	15	8.147	1.300	0.901	0.2007

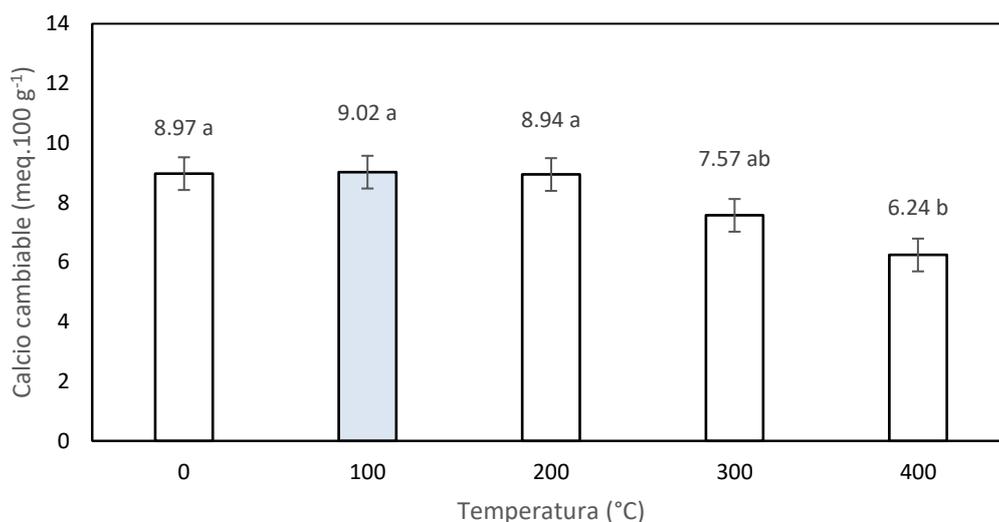
En este caso no hay evidencias para rechazar el supuesto de distribución normal ($p > 0,05$). Se acepta H_0 , se rechaza H_a : las observaciones tienen distribución normal.

Tabla 37.**Análisis de varianza del contenido de Cax del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas**

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Tratamiento	18.080	4	4.520	8.099	0.0035
Error	5.581	10	0.558		
Total	23.661	14			

Tabla 38.***Prueba de Duncan para el Cax del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas***

O. M.	Tratamiento (°C)	Promedio de Cax (meq.100 g ⁻¹)	Significación
1	100	9.02	a
2	0	8.97	a b
3	200	8.94	a b
4	300	7.57	b
5	400	6.24	b

**Figura 15. Variación del calcio cambiante del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico****4.1.2.8. Magnesio cambiante (Mgx) del suelo**

El magnesio cambiante del suelo de Sincos disminuye debido al incremento de temperatura al que fue sometido, alcanzando un promedio de 1.64 meq.100 g⁻¹ a 0 °C y 1.10 meq.100 g⁻¹ a 400 °C (39).

El análisis de varianza presenta un p-valor inferior al nivel de significación ($\alpha = 0.05$), indicando que los tratamientos son diferentes estadísticamente (41).

La prueba de Duncan muestra a los tratamientos de 0 °C y 100 °C en los dos primeros lugares en orden de mérito, sin diferencias estadísticas entre sí, y superiores estadísticamente a los demás tratamientos. Esto se atribuye a la disminución de la cantidad de intercambiadores del suelo, la materia orgánica y arcilla con el incremento de la temperatura, lo que hizo disminuir la cantidad de magnesio cambiante (42 y 16).

Tabla 39.**Resultados del análisis del Mg_x al final del experimento. Suelo de Sincos**

N.º Tratamiento	Repetición	Tratamiento (T °C)	Mg _x (meq.100 g ⁻¹)
1	1	0	1.73
1	2	0	1.53
1	3	0	1.67
Promedio	-	-	1.64
2	1	100	1.63
2	2	100	1.65
2	3	100	1.65
Promedio	-	-	1.64
3	1	200	1.45
3	2	200	1.40
3	3	200	1.52
Promedio	-	-	1.46
4	1	300	1.23
4	2	300	1.22
4	3	300	1.15
Promedio	-	-	1.20
5	1	400	1.17
5	2	400	1.03
5	3	400	1.10
Promedio	-	-	1.10

Tomada del Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes. UNALM, Lima.

Tabla 40.**Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro - Wilks para el Mg_x del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas**

Variable	nMedia	D. E.	W	p
Mg _x (meq.100 g ⁻¹)	151.409	0.238	0.873	0.0708

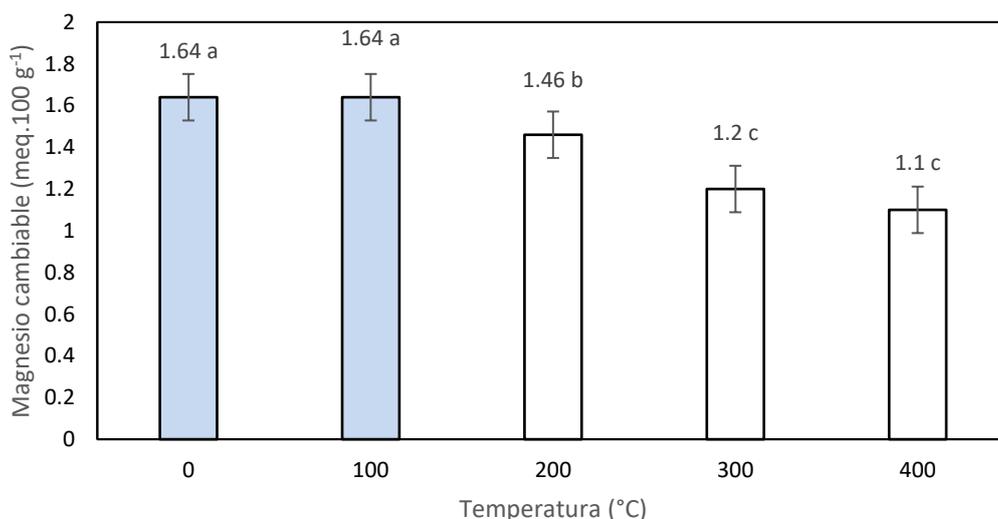
En este caso no hay evidencias para rechazar el supuesto de distribución normal ($p > 0,05$). Se acepta H_0 , se rechaza H_a : las observaciones tienen distribución normal.

Tabla 41.**Análisis de varianza del contenido de Mg_x del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas**

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Tratamiento	0.754	4	0.188	44.655	<0.0001
Error	0.042	10	0.004		
Total	0.796	14			

Tabla 42.***Prueba de Duncan para el Mg_x del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas***

O. M.	Tratamiento (°C)	Promedio (meq.100 g ⁻¹)	Significación
1	0	1.64	a
2	100	1.64	a
3	200	1.46	b
4	300	1.20	c
5	400	1.10	c

***Figura 16. Variación del magnesio cambiante del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico*****4.1.2.9. Potasio cambiante (K_x) del suelo**

El potasio cambiante aumentó en el suelo de Sincos debido al incremento de temperatura, alcanzando valores promedio de 0.40 meq.100 g⁻¹ a los 0 °C y 0.48 meq.100 g⁻¹ a los 400 °C (43).

El análisis de varianza presenta en la fuente de tratamientos un p-valor superior al nivel de significación ($\alpha = 0.05$), indicando que los tratamientos son iguales estadísticamente.

La prueba de Duncan para tratamientos muestra al tratamiento de 400 °C como sobresaliente, sin diferencias significativas con los tratamientos de 300 °C y 200 °C, pero superiores estadísticamente a los tratamientos de 0 °C y 100 °C. Esto se atribuye a la alteración de los minerales primarios, como feldespato y micas, con el incremento de temperatura, que liberaron potasio y se absorbieron

al complejo de cambio (46 y 17).

Tabla 43.

Resultados del análisis del Kx al final del experimento. Suelo de Sincos

N.º Tratamiento	Repetición	Tratamiento (T °C)	Kx (meq.100 g ⁻¹)
1	1	0	0.41
1	2	0	0.41
1	3	0	0.39
Promedio	-	-	0.40
2	1	100	0.35
2	2	100	0.39
2	3	100	0.36
Promedio	-	-	0.37
3	1	200	0.43
3	2	200	0.42
3	3	200	0.43
Promedio	-	-	0.43
4	1	300	0.43
4	2	300	0.47
4	3	300	0.48
Promedio	-	-	0.46
5	1	400	0.56
5	2	400	0.52
5	3	400	0.37
Promedio	-	-	0.48

Tomada del Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes. UNALM, Lima

Tabla 44.

Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro Wilks para el Kx del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas

Variable	n	Media	D. E.	W*	p
Kx (meq.100 g ⁻¹)	15	0,428	0,059	0,921	0,3641

En este caso no hay evidencias para rechazar el supuesto de distribución normal ($p > 0,05$). Se acepta H_0 , se rechaza H_a : las observaciones tienen distribución normal.

Tabla 45.

Análisis de varianza del contenido de Kx del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Tratamiento	0.025	4	0.006	2.799	0.0851
Error	0.023	10	0.002		
Total	0.048	14			

Tabla 46.

Prueba de Duncan para el Kx del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas

O. M.	Tratamiento (°C)	Promedio de Kx (meq.100 g ⁻¹)	Significación
1	400	0.48	a
2	300	0.46	a b
3	200	0.43	a b
4	0	0.40	b
5	100	0.37	b

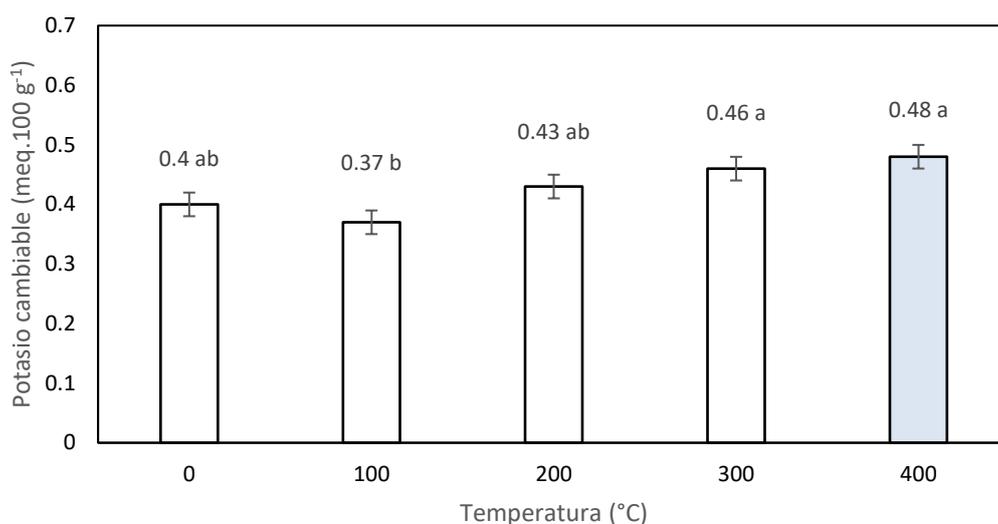


Figura 17. Variación del potasio cambiante del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico

4.1.2.10. Sodio cambiante (Nax) del suelo

El sodio cambiante se incrementó en el suelo debido al efecto de las temperaturas crecientes, teniendo un promedio de 0.17 meq.100 g⁻¹ a los 0 °C y 0.27 meq.100 g⁻¹ a los 400 °C (47).

La prueba de Kruskal-Wallis muestra a los tratamientos de 0 °C a 300 °C sin diferencias significativas entre sí y superiores estadísticamente al tratamiento de 400 °C. Estos resultados se atribuyen a la alteración de los minerales del suelo por efecto de las altas temperaturas e incremento del sodio cambiante (49 y 18).

Tabla 47.**Resultados del análisis del Nax al final del experimento. Suelo de Sincos**

N.º Tratamiento	Repetición	Tratamiento (T °C)	Nax (meq.100 g ⁻¹)
1	1	0	0.18
1	2	0	0.17
1	3	0	0.17
Promedio	-	-	0.17
2	1	100	0.16
2	2	100	0.14
2	3	100	0.15
Promedio	-	-	0.15
3	1	200	0.14
3	2	200	0.15
3	3	200	0.17
Promedio	-	-	0.15
4	1	300	0.16
4	2	300	0.18
4	3	300	0.17
Promedio	-	-	0.17
5	1	400	0.19
5	2	400	0.17
5	3	400	0.45
Promedio	-	-	0.27

Tomada del Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes. UNALM, Lima

Tabla 48.**Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro Wilks para el Nax del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas**

Variable	n	Media	D. E.	W	p
Nax (meq.100 g ⁻¹)	15	0.18	0.08	0.51	< 0.0001

En este caso hay evidencias para rechazar el supuesto de distribución normal ($p < 0,05$). Se acepta H_0 , se rechaza H_a : las observaciones no tienen distribución normal.

Tabla 49.**Prueba de Kruskal-Wallis para el Nax de Sincos sometido a diferentes temperaturas**

O. M.	Tratamiento (°C)	Promedio de Nax (meq.100 g ⁻¹)	Significación
1	100	0.15	a
2	200	0.15	a
3	300	0.17	a b
4	0	0.17	a b
5	400	0.27	b

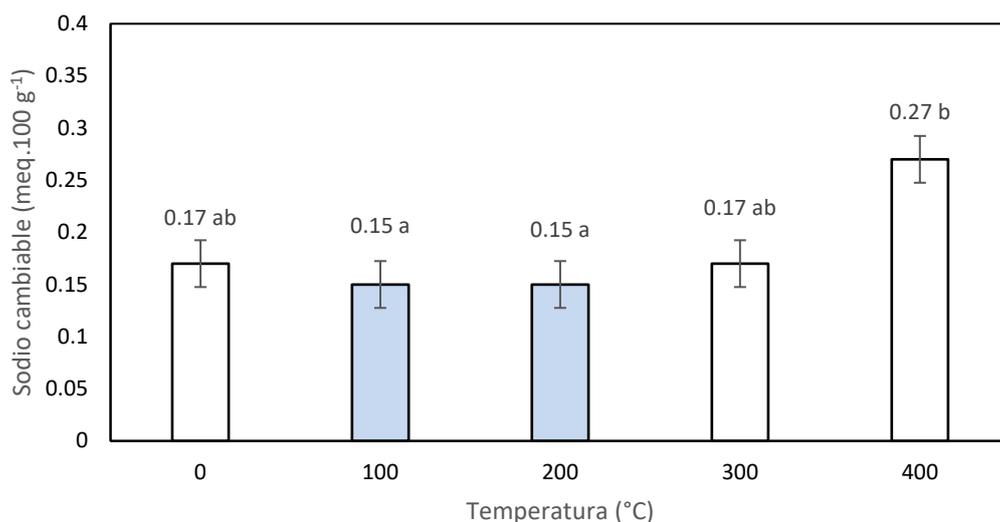


Figura 18. Variación del sodio cambiabile del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico

4.1.2.11. Relación Ca: Mg

La relación Ca: Mg, referido a los cationes cambiabile, no presentó variación debido a las temperaturas crecientes a las que fue sometido el suelo (50).

El análisis de varianza presenta en la fuente de tratamientos un p-valor mayor al nivel de significación ($\alpha = 0.05$), lo que indica que los tratamientos son iguales estadísticamente (52).

La prueba de Duncan no muestra diferencias significativas entre tratamientos, siendo los valores considerados dentro del rango normal (Ca: Mg normal = 5-9) (53 y 19).

Tabla 50.**Resultados del análisis de la relación Ca: Mg al final del experimento. Suelo de Sincos**

N.º	Repetición	Tratamiento (T °C)	Ca:Mg
1	1	0	5.69
1	2	0	5.40
1	3	0	5.26
Promedio	-	-	5.45
2	1	100	5.39
2	2	100	5.46
2	3	100	5.60
Promedio	-	-	5.48
3	1	200	6.41
3	2	200	6.16
3	3	200	5.87
Promedio	-	-	6.15
4	1	300	6.29
4	2	300	6.11
4	3	300	6.54
Promedio	-	-	6.31
5	1	400	6.22
5	2	400	6.59
5	3	400	4.23
Promedio	-	-	5.68

Tomada del Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes. UNALM, Lima

Tabla 51.**Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro - Wilks para la relación Ca: Mg del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas**

Variable	n	Media	D. E.	W	p
Ca:Mg	15	5.81	0,62	0.91	0.2922

En este caso no hay evidencias para rechazar el supuesto de distribución normal ($p > 0,05$). Se acepta H_0 , se rechaza H_a : las observaciones tienen distribución normal.

Tabla 52.**Análisis de varianza del contenido de la relación Ca: Mg del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas**

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Tratamiento	1.859	4	0.465	1.298	0.335
Error	3.581	10	0.358		
Total	5.440	14			

Tabla 53.
Prueba de Duncan para la relación Ca: Mg del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas

O. M.	Tratamiento (°C)	Promedio de Ca:Mg	Significación
1	300	6.31	a
2	200	6.15	a
3	400	5.68	a
4	100	5.48	a
5	0	5.45	a

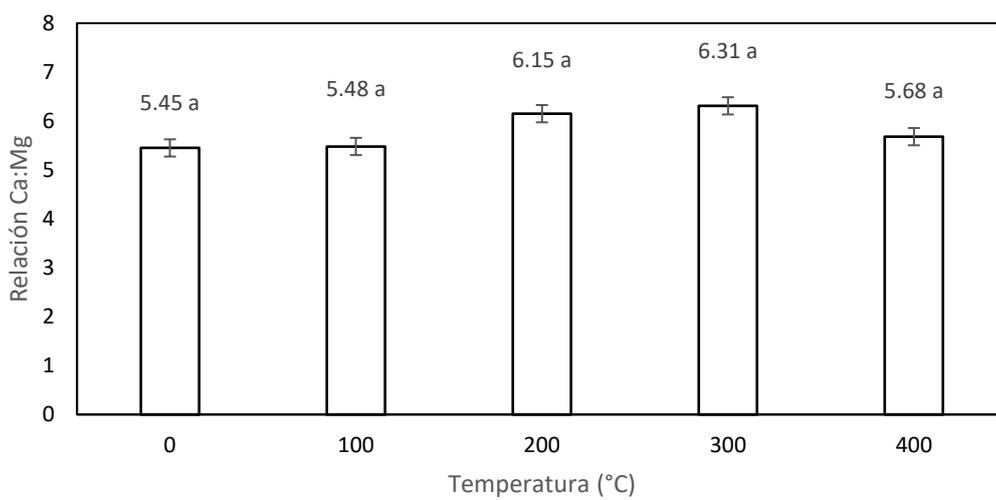


Figura 19. Variación de la relación Ca: Mg del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico

4.1.2.12. Relación K: Mg

La relación K: Mg, referido a los cationes cambiabiles mostró una disminución por efecto del incremento de la temperatura a la que fue sometido el suelo (54).

El análisis de varianza presentó en la fuente de tratamientos un p-valor inferior al nivel de significación ($\alpha = 0.05$), indicando que los tratamientos fueron diferentes estadísticamente (57).

La prueba de Duncan mostró a los tratamientos de 400 °C y 300 °C en los dos primeros lugares en orden de mérito sin diferencias significativas entre sí, pero superiores a los demás tratamientos. Estos resultados se atribuyen al incremento de K cambiabiles y disminución del Mg cambiabiles en el suelo (57 y 20).

Tabla 54.**Resultados del análisis de la relación K: Mg al final del experimento. Suelo de Sincos**

N.º	Repetición	Tratamiento (T °C)	K:Mg
1	1	0	0.23
1	2	0	0.27
1	3	0	0.23
Promedio	-	-	0.24
2	1	100	0.21
2	2	100	0.24
2	3	100	0.22
Promedio	-	-	0.22
3	1	200	0.29
3	2	200	0.30
3	3	200	0.28
Promedio	-	-	0.29
4	1	300	0.39
4	2	300	0.39
4	3	300	0.42
Promedio	-	-	0.40
5	1	400	0.48
5	2	400	0.50
5	3	400	0.34
Promedio	-	-	0.44

Tomada del Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes. UNALM, Lima

Tabla 55.**Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro - Wilks para la relación K: Mg del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas**

Variable	n	Media	D. E.	W	p
K:Mg	15	0.32	0.10	0.87	0.0619

En este caso no hay evidencias para rechazar el supuesto de distribución normal ($p > 0,05$). Se acepta H_0 , se rechaza H_a : las observaciones tienen distribución normal.

Tabla 56.**Análisis de varianza del contenido de la relación K: Mg del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas**

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Tratamiento	0.111	4	0.028	15.793	0.0003
Error	0.018	10	0.002		
Total	0.128	14			

Tabla 57.
Prueba de Duncan para la relación K: Mg del suelo de Sincos sometido a diferentes temperaturas

O. M.	Tratamiento (°C)	Promedio de K:Mg	Significación
1	400	0.44	a
2	300	0.40	a
3	200	0.29	b
4	0	0.24	b
5	100	0.22	b

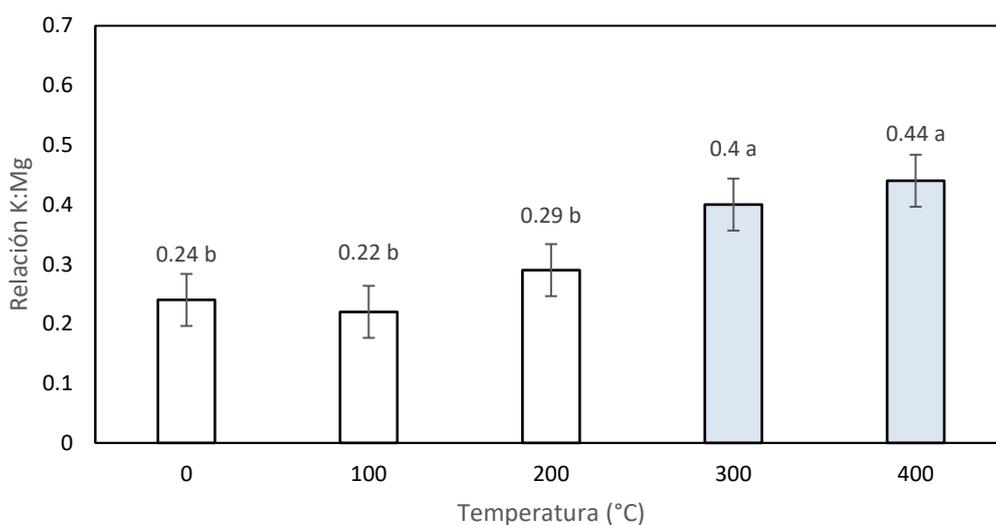


Figura 20. Variación de la relación K: Mg del suelo en función de la temperatura, mostrando el error típico

4.2. Discusión

4.2.1. Propiedades físicas

El contenido de arena aumentó significativamente con el incremento de temperatura al que fueron sometidas las muestras de suelos, siendo el tratamiento 5 (400 °C) el que sobresale, con un promedio de 49%, ocupando el primer lugar en orden de mérito, superando significativamente al tratamiento testigo (0 °C). Los datos se presentan en las tablas (5, 6, 7 y 8), así como en la figura 6.

Este cambio del contenido de arena significó un cambio en la textura del suelo, de franco arcilloso a franco, que influirá en el manejo y uso del suelo; así como su valor económico. Estos datos difieren del trabajo de investigación en condiciones de campo, donde se evaluó el efecto de la tala y quema en las

propiedades físicas de un Alfisol, en Nigeria, donde a pesar de cambios apreciables en la distribución del tamaño de partícula, no cambió la clase textural (14). Es decir, a pesar de realizar el presente experimento en condiciones controladas de laboratorio, se observó similitud en el efecto de la temperatura del horno-mufla, y las condiciones de fuego en el campo, sobre el contenido de arena.

Los datos encontrados en el presente experimento, son similares al trabajo de investigación, donde se sometió dos suelos a un calentamiento artificial y se comparó los cambios en las propiedades físicas y químicas en España, observándose que el calentamiento incrementó las partículas del tamaño de la arena, debido a la fusión de la arcilla, cuando el suelo se calentó a 500 °C (27); en el presente experimento se aplicó una temperatura máxima de 400 °C, indicando entonces que a partir de esta temperatura se altera o descompone la arcilla.

En el contenido de limo, los resultados indicaron que las temperaturas a las que fueron sometidas las muestras de suelo no afectaron significativamente el contenido de limo, una partícula del suelo de tamaño intermedio, que contiene menos cuarzo que la arena, estos datos se presentan en las tablas (9, 10, 11) y figura 7.

Estos resultados son similares a los encontrados en el trabajo de investigación donde se evaluó las propiedades físicas, químicas y biológicas después de una quema en un bosque de eucalipto en Pampa Biome, donde las propiedades físicas del suelo no fueron alteradas por el fuego (29), con la diferencia que en Pampa Biome se trabajó con muestras de 0.00 a 0.05 y 0.05 a 0.20 m; en cambio en el presente experimento se trabajó con una muestra a una profundidad promedio de 0 a 20 cm, demostrando que las temperaturas no afectan significativamente a la cantidad de limo en un suelo.

El efecto de las temperaturas (100 a 400 °C) a las que fueron sometidos las muestras de suelo de Sincos, disminuyó el contenido de arcilla, casi en forma lineal, disminuyendo significativamente en un 7% después de la aplicación de

400 °C y en 5,33% después de la aplicación de 300 °C; debido a la fusión de la arcilla. Los datos se presentan en las tablas 12, 13, 14,15 y Figura 8.

Las altas temperaturas a las que somete el suelo pueden alterar el contenido de arcilla, disminuyéndolo, debido a la agregación de las partículas finas en tamaños de partícula más grande (51).

4.2.2. Propiedades químicas

Los resultados encontrados indican un incremento significativo del pH del suelo entre los 300 y 400 °C, respecto a las temperaturas de 100 y 200 °C, variando de un pH de 6.29 (0 °C) a un pH de 6.55 y 7.47, con temperaturas de 300 °C y 400 °C (9).

Los datos son similares a los encontrados por otros autores después de un fuego prescrito en el suelo (54, 55). Esto se atribuye debido a la pérdida de OH⁻, a la oxidación completa de la materia orgánica y a la liberación de cationes en todos los tipos de fuego (53).

Los datos de pH del presente experimento, que se incrementaron con la mayor temperatura (400 °C), fueron similares a lo encontrado por Badía y Martí (27), quienes sometieron al fuego artificial a dos suelos, uno yesífero y otro calcáreo, y el incremento de pH se observó a los 500 °C; demostrándose que las altas temperaturas disminuyen el pH del suelo.

La conductividad eléctrica de la muestra de suelo de Sincos, aumentó significativamente cuando se sometió a las temperaturas de 400 °C y 300 °C, de 0,603 dS.m⁻¹ (0 °C) a 1,257 y 1,753 dS.m⁻¹, respectivamente. Estos datos se presentan en las tablas 19, 20, 21 y figura 10. La variación observada, a pesar de ser significativa no cambia el nivel de salinidad del suelo, manteniéndose como un suelo sin afectación por exceso de sales (< 4 dS.m⁻¹).

Estos datos son diferentes a los encontrados por otros autores; por ejemplo, a 250 °C dos suelos, uno yesífero y otro calcáreo incrementaron la CE cuando fueron sometidos a calentamiento artificial, pero cuando los mismos

suelos se sometieron a calentamiento artificial de 500 °C, disminuyó la CE (27). Otros autores concuerdan con los resultados observados en otros trabajos de investigación, donde la conductividad eléctrica tiende a incrementarse inmediatamente después del fuego prescrito en campo (57), debido a la liberación de iones solubles durante la combustión de la materia orgánica del suelo y la incorporación de cenizas (53).

La materia orgánica del suelo de Sincos, disminuyó significativamente a 400 °C y 300 °C respectivamente, desde valores de 1.870 % de MO (0 °C) hasta 1.167% de MO (300 °C) y 0.760% de MO (400 °C); a pesar de tener el suelo de Sincos bajos contenidos de materia orgánica (< 2%).

Estos datos observados están relacionados al efecto de las altas temperaturas a que es sometido el suelo, especialmente cuando el fuego, producto de los incendios forestales, son de media y alta intensidad, lo que causa disminución del contenido de carbono orgánico del suelo (60).

Considerando que la materia orgánica mayormente se concentra en la capa superficial de los suelos minerales, cuando son afectados por el fuego muestran bajo contenido de materia orgánica libre, baja polimerización de ácidos fúlvicos e incrementan el contenido de ácidos húmicos, y cuando el fuego se incrementa, y también la temperatura, el suelo puede convertirse en un medio inerte (61). Contrariamente, las temperaturas del suelo producidas durante fuegos de baja intensidad no producen apreciables cambios en la materia orgánica del suelo (68).

En el trabajo de investigación de Hatten and Zabowski (25), se examinó el efecto de la severidad del fuego en las formas de materia orgánica del suelo y su mineralización, mostrando que el principal impacto ocurrió en el horizonte O y el cambio relacionado al suelo mineral, no fue persistente. Este resultado indica que cuando el suelo tiene alto contenido de materia orgánica, el efecto del fuego, por las altas temperaturas es mayor, pero en el caso del presente experimento no se tuvo horizonte O, sino horizonte A, que tiene menos MO que el horizonte O y los efectos fueron significativos; por lo que, al margen del horizonte y del

contenido de materia orgánica, se puede observar que el efecto de las altas temperaturas disminuyen el contenido de MO a nivel de calentamiento artificial y fuego en el campo.

El fósforo disponible del suelo de Sincos, incrementó significativamente debido al efecto de las temperaturas a 200 °C, 300 °C y 400 °C, desde valores calificados como medios, de 10,313 ppm (0 °C) a valores calificados como altos de 24, 600; 52,567 y 65,633 (200 °C, 300 °C y 400 °C respectivamente). Los datos se presentan en las tablas 25, 26 y 27, y figura 12.

Esto es debido a que la combustión de la materia orgánica deja una cantidad relativamente grande de fósforo altamente disponible en las cenizas de la superficie del suelo inmediatamente después del fuego (63). La severidad del fuego afecta los cambios en el fósforo extractable del suelo; durante los fuegos de alta severidad, el 50 al 60% del fuego debería perderse por volatilización; pero parte de este fósforo volatilizado termina como un incremento de fósforo disponible en el suelo y en las cenizas después de la quema (67).

Saa *et al.* (26), evaluaron cambios de P en suelos afectados por incendios forestales, muestreados entre un día y un mes después de la quema a profundidades de 0 - 5 y 5 - 10 cm, observándose un intenso efecto mineralizante sobre el P orgánico, consecuentemente el P inorgánico incrementó grandemente; lo que confirma el efecto de las altas temperaturas sobre el incremento del P disponible del suelo, cuando se produce fuego en el suelo o cuando el suelo se somete experimentalmente a altas temperaturas.

Los resultados observados para K, después de someter al suelo de Sincos a diferentes temperaturas, simulando la acción del fuego en el incremento de temperatura del suelo; presentan un marcado efecto significativo del tratamiento de 400° y 300 °C, donde se incrementó el potasio extractable, desde valores de 162 ppm de K (°C) hasta valores de 202 ppm de K (300 °C) y 210 ppm K (400 °C). Estos valores se encuentran calificados como niveles medios (100 a 240 ppm K). Los datos se presentan en las tablas 28, 29, 30, 31 y figura 13.

Estos datos, concuerdan con los resultados encontrados en el experimento sobre efectos de la intensidad del calor y cenizas de plantas sobre las propiedades físicas y químicas de dos suelos contrastantes, uno yesífero y otro calcáreo, en España, donde ambos suelos fueron calentados a temperaturas de 25, 150, 250 y 500 °C en un horno mufla, y se incrementó la disponibilidad de nutrientes (27); debido a las semejanzas que presenta el suelo de Sincos con el suelo calcáreo estudiado en esa investigación, y donde se observó el incremento de la disponibilidad de K, nutriente de las plantas.

La temperatura de 400 °C a la que se sometió al suelo de Sincos, disminuyó significativamente la CIC del suelo, desde valores de 13.55 meq.100 g⁻¹ (0 °C) hasta 9.33 meq.100 g⁻¹ (400 °C). Los valores de CIC en las muestras sometidas a temperaturas de 100 a 300 °C tuvieron menor disminución. Los datos se presentan en las tablas 32, 33, 34, 35 y figura 14.

Estos resultados se deben a la combustión de la materia orgánica del suelo y a la transformación de los minerales de arcilla; y considerando que tanto la MO como la arcilla, estas son las dos principales fuentes de la CIC del suelo, por lo tanto, la CIC disminuye especialmente después del fuego en los primeros pocos centímetros de profundidad del suelo; esta disminución puede ser más o menos importante dependiendo de la intensidad del fuego, la temperatura que se alcance en el suelo, el contenido de materia orgánica antes del fuego, mineralogía del suelo y la proporción de arcilla (63).

Estos resultados están relacionados con lo reportado por Lerma *et al.* (22), quienes evaluaron dos suelos, separando la fracción coloidal inorgánica, y sometiéndola a temperaturas desde 150 a 550 °C, observándose disminución de la CIC, junto con la eliminación de materia orgánica; esto evidencia que la disminución de la fracción coloidal inorgánica (arcilla), por el efecto de altas temperaturas, y de la fracción coloidal orgánica (MO) reducen significativamente la CIC del suelo; esto también se evidenció en el suelo de Sincos, cuando el suelo completo fue sometido a temperaturas entre 100 y 400 °C.

Los cationes cambiabiles del suelo de Sincos, tuvieron variación como

resultado de ser sometidos a niveles crecientes de temperatura; el calcio y magnesio cambiabiles disminuyeron significativamente, especialmente a los 300 y 400 °C; el potasio cambiabile se incrementó significativamente a los 300 y 400 °C; y el sodio cambiabile no fue afectado significativamente por las diferentes temperaturas a que fue sometido el suelo. Los datos se presentan en las tablas 36 a 50, y las figuras 15 a 18.

El contenido de cationes cambiabiles es afectado por los diferentes niveles de temperatura en el suelo; siendo el umbral de temperatura los 450 °C (63). Los datos encontrados en el presente experimento difieren de los resultados observados en incendios forestales, por ejemplo, en la investigación donde se evaluaron las propiedades físicas, químicas y biológicas después de un incendio forestal en bosque de eucalipto, el fuego incrementó el contenido de potasio, calcio y magnesio (29).

En el trabajo de Torres *et al.* (23) en la SAIS Túpac Amaru, Junín; el fuego controlado sobre las pasturas no hizo variar a los cationes cambiabiles; a diferencia del suelo de Sincos donde sí se afectó a los cationes cambiabiles, excepto el sodio; debido posiblemente al efecto del fuego controlado en el caso de la SAIS Túpac Amaru y las altas temperaturas a que se sometió el suelo en el caso de Sincos.

Las diferentes temperaturas a que fue sometido el suelo de la capa superficial de Sincos no afectó significativamente la relación Ca: Mg, como se observa en las tablas 51 a 54 y figura 19. Esto puede explicarse debido al consumo de las plantas y la lluvia que proporciona cationes en el siguiente orden: Ca²⁺ + 1.152 g/kg, K + 0.156 g/kg, Mg²⁺ + 0.119 g/kg (A).

Este efecto es favorable pues no se alteran las relaciones catiónicas entre calcio y magnesio del complejo de cambio, que podría ocasionar deficiencia o exceso de Mg o Ca. Los valores son considerados normales (70).

La relación K: Mg se incrementó significativamente en el suelo de Sincos, por efecto del incremento de temperatura, especialmente a 300 °C y 400 °C;

pudiendo generar una deficiencia de magnesio debido al incremento de potasio (70). Los datos se presentan en las tablas 55 al 58 y figura 20.

CONCLUSIONES

1. El efecto de la quema a temperaturas crecientes se observó a los 300 °C y 400 °C, donde la quema del suelo de Sincos incrementó el contenido de arena y disminuyó el contenido de arcilla, sin afectar el porcentaje de limo; variando la clase textural de franco arcilloso a franco. Asimismo, incrementó el pH, la conductividad eléctrica, el fósforo disponible, el potasio extractable y disminuyó el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, el calcio y magnesio.
2. La quema a temperaturas crecientes de 0 °C a 400 °C afectó la distribución del tamaño de partículas de un suelo agrícola de Sincos de la siguiente manera: se incrementó significativamente el porcentaje de arena, con el aumento de la temperatura, obteniéndose un promedio de 49% a 400 °C, comparado al 42% con 0 °C; el porcentaje de limo no tuvo variación significativa debido al aumento de la temperatura y el porcentaje de arcilla disminuyó significativamente con el incremento de temperatura, obteniéndose 27% a 0 °C y 20% a 400 °C.
3. La quema a temperaturas crecientes de 0 °C a 400 °C tuvieron efecto en las propiedades químicas de un suelo agrícola de Sincos, con el siguiente detalle: el pH incrementó significativamente a la temperatura de 300 y 400 °C, respecto a la temperatura de 100 °C, cambiando de un nivel ligeramente ácido a ligeramente alcalino; la conductividad eléctrica del suelo de Sincos incrementó significativamente, debido a las altas temperaturas, alcanzando el valor de 1.753 dS.m⁻¹ a 300 °C comparado a 0.603 dS.m⁻¹, a 0 °C, pero manteniéndose en ambos casos en un nivel sin exceso de sales; la materia orgánica disminuyó significativamente debido al incremento de temperatura, de 1,973% a 0 °C a 0,760% a 400 °C, manteniéndose en ambos casos en niveles bajos; el contenido de fósforo disponible, incrementó significativamente, a temperaturas de 300 °C y 400 °C, con un promedio de 65.63 ppm y 52.57 ppm respectivamente, respecto a las temperaturas de 0 °C y 100 °C, donde se tuvo 10,31 ppm y 11.33 ppm respectivamente, el potasio disponible del suelo se incrementó significativamente, a temperaturas de 300

°C y 400 °C con promedios de 202 ppm y 210 ppm, comparado a la temperatura de 100 °C que tuvo un promedio de 152.33 ppm; la CIC disminuyó significativamente con el incremento de temperatura, alcanzando 9.333 cmol/kg a 400 °C, comparado a 13.547 cmol/kg a 0 °C; el calcio y magnesio cambiables disminuyeron significativamente con el incremento de temperatura, alcanzando los valores más bajos a 300 °C y 400 °C, respecto a la temperatura de 100 °C; el potasio y sodio cambiable se incrementó significativamente a 400 °C comparado a la temperatura de 100 °C; la relación Ca:Mg no fue afectada significativamente por el incremento de temperatura en el suelo; la relación Mg:K aumentó significativamente a altas temperaturas respecto a las temperaturas de 0 °C y 100 °C.

RECOMENDACIONES

1. Realizar ensayos de laboratorio con suelos de diferentes tipos de vegetación, con diferentes niveles de temperatura, que son sometidos a quema, en el valle del Mantaro, con el fin de observar el cambio de las propiedades físicas, químicas y biológicas en el suelo.
2. Verificar los umbrales de temperatura para los nutrientes presentes en el suelo y la materia orgánica, a diferente profundidad del suelo, con el fin de determinar la intensidad del fuego a que deben ser sometidos los suelos con diferente tipo de vegetación.

LISTA DE REFERENCIAS

1. **KETTERINGS, Q.M., BIGHAM J.M., and LAPERCHE V.** *Changes in soil mineralogy and texture caused by slash and burn fires in Sumatra, Indonesia.* Soil Sci. Soc. Amer. J. 64:1108-1117. 2000.
2. **DRYNESS, C.T.** *Effects of wildfire on soil wettability in the high cascades of Oregon, USDA Forest Service Research Paper PNW-202.* (Washington, DC: USDA). 1976.
3. **RAISON, R.J.** Modification of the soil environment by vegetation fires, with reference to nitrogen transformations: *A review.* *Plant and Soil* 51:73-108. 1979.
4. **MARCOS, E.P., ALONSO P., TÁRREGA R., and LUIS-CALABUIG, E.** Temporary changes of the edaphic characteristics during the first year of postfire regeneration in two oak groves. *Arid Soil Research and Rehabilitation* 10: 280-297. 1995.
5. **DEBANO, L.F., and CONRAD C.E.** The effects of fire on nutrients in a chaparral ecosystem. *Ecology* 59:489-497. 1978.
6. **UNEP. GEO-2000.** *The State of the Environment: A Global Overview.* United Nations Environment Programme, Niarobi. 1999.
7. **JRC.** *The Global Burned Area 2000 Project, GBA 2000 statistics.* Joint Research Centre, European Commission, Ispra, Italy. 2003.
8. **KOZLOWSKI T.T. and AHLGREN, C.E.** *Fire and Ecosystems.* Academic Press, New York. 1974.
9. **RAISON, R.J.** *Modification of the soil environment by vegetation fires, with reference to nitrogen transformation: a review.* *Plant Soil* 51, 73-108. 1979.
10. **CHANDLER, C., CHENEY, Ph, THOMAS, Ph, TRABAUD, L., and WILLIAMS, D.** *Fire in forestry. Forest Fire Behaviour and Effects,* vol. I. Wiley, New York. 1983.
11. **CARBALLAS, T., VILLAR, M.C., CABANEIRO, A., ACEA, M.J., TRASAR, C., CARBALLAS, M., PAZ- ANDRADE, M.I., DÍAZ-RAVIÑA, M., NODAR, R., SAÁ, A., FERNÁNDEZ, I., PRIETO-FERNÁNDEZ, A., VÁZQUEZ, F.J., ZEHNER, R.** Effects of fires on soil quality. Biochemical aspects. In: Balabanis, P., Eftichidis, G., Fantechi, R. (Eds.), *Forest Fire Risk and Management.* ECSC-EC-EAEC, Brussels, pp. 250–261. 1997.

12. **DEBANO, L.F., NEARY, D.G., and FOLLIOTT.** *Fires Effects on Ecosystems.* Wiley, New York. 1998.
13. **INDECI.** *Compendio Estadístico.* Instituto Nacional de Defensa Civil. Lima, Perú. 2016.
14. **GONZÁLEZ U., P.** *Impacto de los incendios forestales en suelo, agua, vegetación y fauna.* Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Departamento de estudios y publicaciones. 2017.
15. **PRIETO-FERNÁNDEZ, A., CARBALLAS M., and CARBALLAS T.** *Inorganic and organic N pools in soils burned or heated: immediate alterations and evolution after forest wildfires.* *Geoderma* 121:291-306. 2004.
16. **WEIL, R., and BRADY N.** *The nature and Properties of Soils.* New York, USA. Pearson, 2016. 15.
17. **WIETING, C., BRIAN A., and SINGHA K.** Quantifying the effects of wildfire on changes in soil properties by surface burning of soils from the Boulder Creek Critical Zone. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 13: 43-57. 2017.
18. **KEELEY, J.E.** *Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage.* *Int. J. Wildland Fire* 18(1), 116-126. 2009.
19. **MOODY J.A., EBEL B.A., NYMAN, P., MARTÍN, D.A., STOOF, C., MCKINLEY, R.** *Relations between soil hydraulic properties and burn severity.* *Int. J. Wildland Fire* 25(3), 279- 293. 2016.
20. **STOOF, C.R., WESSELING, J.G., RITSEMA, C.J.** Effects of fire and ash on soil water retention. *Geoderma* 159, 276-285. 2010.
21. **PICQUART, M. y CARRASCO MORALES I.** *De la temperatura y su medición.* *Lat. Am. J. Phys. Educ.* Vol. 11, N° 1, 13010-1-12 March. 2017.
22. **LERMA, H.T.A.; COMBATT, E.M.; PALENCIA, L.M.S.** Efecto de la temperatura sobre coloides de suelos agrícolas mediante dispersión dinámica de la luz. *Revista de Ciencias Agrícolas.* Volumen 32(2):94-103. 2015.
23. **TORRES, V.D.L.; QUIRÓZ GUERRA, R. y JUSCAMAITA MORALES, J.** *Efecto de una quema controlada sobre la población microbiana en suelos con pasturas en la SAIS Túpac Amaru-Junín, Perú.* *Ecología Aplicada* 3 (1, 2). 2004.

24. **DOMÍNGUEZ CÉSPEDES, H.D.** *Estudio de las propiedades físicas y químicas del suelo producidas por la quema controlada de vegetación en el Municipio de Cumaribo, departamento del Vichada.* Tesis para optar el título de Magister Scientiae en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Universidad de Caldas, Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas. Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Manizales, Colombia. 2016.
25. **HATTEN, J.A. and ZABOWSKI.** *Changes in Soil Organic Matter Pools and Carbon Mineralization as Influenced by Fire Severity.* Soil Sci. Soc. Am. J. 73:262-273. 2007.
26. **SAA, A.; TRASAR-CEPEDA M.C.; GIL-SOTRES F. and CARBALLAS T.** *Changes in soil phosphorus and acid phosphatase activity immediately following forest fires.* Soil Biol. Biochem. Vol. 25, N.º 9, pp. 1223-1230. 1993.
27. **BADÍA, D. and MARTÍ CL.** *Plant Ash and Heat Intensity Effects on Chemical and Physical Properties of Two Contrasting Soils.* Arid Land Research and Management 17:23-41. 2003.
28. **MONTOYA S., MARÍN G. and ORTEGA E.** Impact of prescribed burning on soil properties in a Mediterranean area (Granada, SW Spain). *Spanish Journal of Soil Science.* Vol. 4, Issue 1. 2014.
29. **ALMEIDA S., N.; SANTANA MORALES, C.A.; AMARO DA SILVA, D.A.; ANTONIOLLI, Z.I. and SEMINOTI JACQUES, R.J.** Soil Biological, Chemical, and Physical Properties After a Wildfire Event in a Eucalyptus Forest in the Pampa Biome. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo.* 42: 2018.
30. **PICQUART, M., y CARRASCO MORALES, I.** De la temperatura y su medición. *Lat. Am. J. Phys. Educ.* Vol. 11, N.º 1, March. 2017.
31. **GEANKOPLIS, C.J.** *Procesos de transporte y principios de procesos de separación.* 4ta.edición. México. Grupo Patria Cultural. Páginas 7, 62-64, 244-249, 186-289, 335- 336, 981, 996. 2006.
32. **KEELEY, Jon E.** Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire* 18, 116-126. 2009.
33. **SUGIHARA, N.G., VAN WAGTENDONK, J.W., FITES-KAUFMAN, J.** Fire as an ecological process. In *"Fire in California's Ecosystems"* (Eds NG Sugihara, J.W. van Wagtendonk, KE Shaffer, J. Fites-Kaufman, A.E. Thode)

- pp. 58-74 (University of California: Los Angeles, C.A.). 2006.
34. **MIYANISHI, K.** Duff consumption. In *"Forest Fires: Behavior and Ecological Effects"*. (Eds E.A. Johnson, K. Minanishi) pp. 437-475. (Academic Press: San Francisco, C.A.). 2001.
 35. **DEBANO, L.F.** Water repellency in soils: a historical overview. *Journal of Hidrology* 231- 232, 4-32. 2000.
 36. **BROOKS M.L.** Peak fire temperatures and effects on annual plants in the Mojave Desert. *Ecological Applications* 12, 1088-1102. 2002.
 37. **KEELEY J.E. and MCGINNIS T.** Impact of prescribed fire and other factor son cheatgrass persistence in a Sierra Nevada ponderosa pine forest. *International Journal of Wildland Fire* 16, 96-106. 2007.
 38. **SMITH A.M.S., WOOSTER M.J., DRAKE N.A., DIPOTSO F.M., FALKOWSKI M.J. and HUDAK A.T.** Testing the potential of multi-spectral remote sensing for retrospectively estimating fire severity in African savannahs. *Remote Sensing of Environment* 97, 92- 115. 2005.
 39. **JAIN T., PILLIOD D., GRAHAM R.** *Tongue-tied*. *Wildfire* 4, 22-36. 2004

 40. **DICKINSON M.B., JOHNSON E.A.** Fire effects on trees. In *"Forest Fires: Behavior and Ecological Effects"*. (Eds. E.A. Johnson, K. Miyanishi). Pp. 477-525 (Academic Press: San Francisco, C.A.) 2001.
 41. **ICE G.G., NEARY D.G., and ADAMS P.W.** Effects of Wildfire on soils and watershed processes. *Journal of Forestry* 102, 16-20. 2004.
 42. **ROGAN J., FRANKLIN J.** Mapping wildfire burn severity in southern California forests and shrublands using Enhanced Thematic Mapper imagery. *Geocarto International* 16(4), 91-106. 2001.
 43. **VAN WAGTENDONK J.W., ROOT R.R., and KEY C.H.** Comparison of AVIRIS and Landsat ETM + detection capabilities of burn severity. *Remote Sensing of Environment* 92, 397-408. 2004.
 44. **KOKALY R.F., ROCKWELL B.W., HAIRE S.L., and KING T.V.V.** Characterization of post-fire surface cover, soils, and burn severity at the Cerro Grande Fire, New Mexico, using hyperspectral and multispectral remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 106, 305-325. 2007.

45. **JOHNSON E.A. and MIYANISHI K.** Strengthening fire ecology's roots. In "Forest Fires": Behavior and Ecological Effects". (Eds E.A. Johnson, K. Miyanishi). pp. 1-9. (Academic Press: San Diego, C.A.) 2001.
46. **MICHALETZ S.T. and JOHNSON E.A.** Fire and Biological processes. *Journal of Vegetation Science* 14, 622-623. 2003.
47. **PÉREZ-CABELLO F, FERNÁNDEZ J.R. LLOVERÍA R.M. and GARCÍA-MARTÍN A.** Mapping erosion-sensitive areas after wildfires using fieldwork, remote sensing, and geographic information systems techniques on a regional scale. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* 111. 2006.
48. **TAN, K.H., HAJEH, B.F., BARSHAD, I., and KLUTE, A.** Thermal analysis techniques. *Methods of Soil Analysis.1. Physical and Mineralogical Methods.* American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 151-183.1986.
49. **AFIF, E., OLIVERA, P.,** Efectos del fuego prescrito sobre el matorral en las propiedades del suelo. *Investig. Agrar. Sist. Recur. For.* 15(3), 262-270. 2006.
50. **GRANGED, A.J.P., ZAVALA, L.M., JORDÁN, A., BÁRCENAS-MORENO, G.** Post-fire evolution of soil properties and vegetation cover in a Mediterranean health land after experimental burning: a 3-year study. *Geoderma* 164, 85-94. 2011.
51. **HUBBERT, K.P., PREISLER, H.K., WOHLGEMUTH, P.M., GRAHAM, R.C., NAGROG, M.G.** Prescribe burning effects on soil physical properties and soil water repellency in a steep chaparral watershed, southern California, USA, *Geoderma* 130(3-4), 284-298. 2006.
52. **PIERSON, F.B., ROBICHAUD, P.R., MOFFET, C.A., SPAETH, K.E., WILLIAMS, C.J., HARDEGREE, S.P., and CLARK, P.E.** Soil water repellency and infiltration in coarse-textured soils of burned and unburned sagebrush ecosystems. *Catena* 74(2), 98-108. 2008.
53. **CERTINI, G.** Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia* 143, 1-10. 2005
54. **SCHARENBRUCH, B.C., NIX, B., JACOBS, K.A., BOWLES, M.L.** Two decades of low-severity prescribed fire increases soil nutrient availability in Midwestern, USA oak (*Quercus*) forest. *Geoderma* 183-184, 89-91. 2012.
55. **SWITZER, J.M., HOPE, G.D., GRAYSTON, S.J., PRESCOTT, C.E.**

- Changes in soil chemical and biological properties after thinning and prescribed fire for ecosystem restoration in a Rocky Mountain Douglas-fir Forest. For Ecol. Manag.* 175, 1-13. 2012.
56. **MUQADDAS, B., ZHOU, X., LEWIS, T., WILD, C., CHEN, C.** *Long-term frequent prescribed fire decreases surface soil carbon and nitrogen pools in wet sclerophyll forest of Southeast Queensland, Australia, Sci. Total Environ.* 536, 39-47. 2015.
57. **ALCAÑIZ, M., OUTERIO, L., FRANCOS, M., FARGUELL, J., and ÚBEDA, X.** *Long-term dynamics of soil chemical properties after a prescribed fire in a Mediterranean forest (Montgrí Massif, Catalonia, Spain). Sci. Total Environ.* 572, 1329-1335. 2016.
58. **BRYE, K.R.** *Soil physicochemical changes following 12 years of annual burning in a humid-subtropical tallgrass prairie: a hypothesis. Acta Oecol.* 30, 407-413. 2006.
59. **ALCAÑIZ, M., OUTERIO, L., FRANCOS M., and ÚBEDA X.** Effects of prescribed fires on soil properties: A review. *Science of the Total Environment* 613-614, 944-957. 2018.
60. **MATAIX-SOLERA, J., CERDA, A., ARCENEGUI, V., JORDÁN, A. and ZAVALA, L.M.** Fire effects on soil aggregation: A review. *Earth-Science Reviews* 109, 44-60. 2002.
61. **KNOEPP, J.D., DEBANO, L.F., NEARY D.G.** *Soil chemistry. In Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water*, NEARY, D.G., RYAN K.C., DEBANO L.F. (eds), General Technical Report RMRS-GTR-42-vol.4. United States Department of Agriculture, Forest Service and Rocky Mountain Research Station, Ogden, UT, pp. 53-71. 2005.
62. **GIL, J., ZAVALA, L.M., BELLINFANTE, N., JORDÁN, A.** *Acidez y capacidad de intercambio catiónico en los suelos afectados por incendios. Métodos de determinación e interpretación de resultados. In actualización en métodos y técnicas de estudios de suelos afectados por incendios forestales*, A. Cerda, A. Jordán (eds.), Cátedra de Divulgación de la Ciencia, Valencia, pp. 315-331. 2010.
63. **NEARY, D.G., RYAN K.C. and DEBANO L.F.** *Wildland fire in ecosystems. Effects of fire on soil and water. United Department of Agriculture. Forest Service. Rocky Mountain Research Station. General Technical Report*

RMRS-GTR-42-Volume 4. 2005.

64. **DEBANO, L.F.** *The effect of fire on soil.* In: Harvey A.E.; Neuenschwander, L.F. (eds.). *Management and productivity of western-montane forest soils.* Gen. Tech. Rep. INT-280. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest, and Range Experiment Station: 32-50. 1991.
65. **SOTO, B. and DÍAZ-FIERROS, F.** Interactions between plant ash leachates and soil. *International Journal of Wildland Fire.* 3(4): 207-216. 1993.
66. **RAISON, R.J.; KEITH, H.; KHANNA, P.K.** Effects of fire on the nutrient supplying capacity of forest soils. In: Dyck, W.J.; Meeg, C.A. (eds.). *Impact of intensive harvesting on forest site productivity.* Bull. N.º 159. Rotorua, New Zealand: Forest Research Institute: 39-54. 1990.
67. **ROMANYA, J.; KHANNA, P.; RAISON, R.J.** *Effects of slash burning of soil phosphorus fractions and sorption and desorption of phosphorus.* Forest Ecology and Management. 65: 89-103. 1994.
68. **DEBANO, L.F.** *The effect of fire on soil properties. Paper presented at the Symposium on Management and Productivity of Western-Montane Forest Soils,* Boise, ID. 1990.
69. **RYAN, K.C.** *Dynamic interactions between forest structure and fire behavior in boreal ecosystems.* Silva Fennica 36 (1): 13-39. 2002.
70. **BAZÁN, T.L.** *Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego.* Ministerio de Agricultura. Instituto Nacional de Innovación Agraria. Lima, Perú. 2017.
71. **ARROYO ALIAGA, J.** *¿Cómo ejecutar un plan de investigación? En: Manual del Investigador, 2: Pasos para investigar científicamente hechos o fenómenos.* Fundación para el Desarrollo y Aplicación de las Ciencias. 2012.
72. **STEEL, R.G.D y TORRIE, J.H.** *Bioestadística: principios y procedimientos.* Segunda edición. McGraw-Hill. Madrid. 1985.
73. **JACKSON, M.L.** *Análisis químico de suelos.* Tercera edición. Omega. Barcelona, España. 1976.
74. **BERNAL, T.C.A.** *Metodología de la investigación.* Tercera edición. Prentice Hall. México. 2010.
75. **CERRAGA, José.** *Metodología de la Investigación Científica y Tecnológica.* Madrid, España: Editorial Díaz de Santos, 2012.
76. **CONAF.** *Manual de medidas de prevención de incendios forestales.* 2011.

77. **SERFOR**. *Plan de prevención y reducción de riesgos de incendios forestales*. Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. 2018.
78. **NWCG**. *Glossary of wildland fire terminology*. National Wildfire Coordinating Group, Incident Operations Standards Working Team. Available at <https://www.nwccg.gov/publications> (verified 17 november 2020).
79. **USDA**. *Wildland fire in ecosystems*. Effects of fire on soil and water. 2005.
80. **NWCG**. *Glossary of wildland fire, PMS 205*. National Wildfire coordinating group. 2020.
81. **ÁVILA, A., ALARCÓN, M.**, 1999. *Relationship between precipitation chemistry and meteorological situations at a rural site in NE Spain*. Atmos. Environ. 33, 1663–1677

ANEXOS

Resultados de análisis de suelo



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
 FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS
 LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION

Solicitante : LYZ HUAMAN CARDENAS

Departamento : JUNIN

Distrito : SINCOS

Referencia : H.R. 66213-173C-18

Bolt: 2151

Provincia : JAUJA

Predio :

Fecha : 07/12/18

Lab	Número de Muestra Claves	pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
								Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺³ + H ⁺			
16222	Clone: T5R2	6.41	0.64	0.00	0.34	28.0	173	49	29	22	Fr.	7.20	4.65	1.10	0.37	0.45	0.00	6.57	6.57	91

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso



Dr. Sady García Bendezo
 Jefe del Laboratorio



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
 FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS
 LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION

Solicitante : LYZ HUAMÁN CÁRDENAS

Departamento : JUNIN

Distrito : SINCOS

Referencia : H.R. 65921-167C-18

Bolt: 2151

Provincia : JAUJA

Fredio :

Fecha : 23/11/18

Número de Muestra Lab	Claves	pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
								Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺ + H ⁺			
15323	T4 R1	6.75	1.70	0.00	0.98	88.4	206	49	32	19	Fr.	11.20	7.76	1.23	0.48	0.16	0.00	9.63	9.63	86
15324	T4 R2	6.28	1.84	0.00	1.26	59.3	198	47	28	25	Fr.	12.00	7.43	1.22	0.47	0.18	0.00	9.30	9.30	78
15325	T4 R3	6.82	1.72	0.00	1.26	89.2	202	45	34	21	Fr.	10.86	7.52	1.15	0.48	0.17	0.00	9.33	9.33	86
15326	T5 R1	7.05	1.46	0.00	0.89	68.0	235	43	36	21	Fr.	11.20	7.26	1.17	0.56	0.19	0.00	9.18	9.18	82
15327	T5 R3	6.96	1.67	0.00	1.25	81.7	222	55	28	17	Fr.A.	9.80	6.81	1.03	0.52	0.17	0.00	8.54	8.54	89

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franco ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ;
 Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso



Sady García Bendezu
 Dr. Sady García Bendezu
 Jefe del Laboratorio

MÉTODOS SEGUIDOS EN EL ANÁLISIS DE SUELOS

1. Textura de suelo: % de arena, limo y arcilla; método del hidrómetro.
2. Salinidad: medida de la conductividad eléctrica (CE) del extracto acuoso en la relación suelo: agua 1:1 o en el extracto de la pasta de saturación(es).
3. PH: medida en el potenciómetro de la suspensión suelo: agua relación 1:1 ó en suspensión suelo: KCl N, relación 1:2.5.
4. Calcio total (CaCO₃): método gaso-volumétrico utilizando un calcímetro.
5. Materia orgánica: método de Walkley y Black, oxidación del carbono Orgánico con dicromato de potasio, %M.O. = %Cx1.724.
6. Nitrógeno total: método del micro-Kjeldahl.
7. Fósforo disponible: método del Olsen modificado, extracción con NaHCO₃ 0.5M, pH 8.5.
8. Potasio disponible: extracción con acetato de amonio (CH₃ - COONH₄)N, pH 7.0.
9. Capacidad de intercambio catiónico (CIC): saturación con acetato de amonio (CH₃ - COOCH₃)N; pH 7.0.
10. Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺ cambiabiles: reemplazamiento con acetato de amonio

(CH₃ - COONH₄)N; pH 7.0 cuantificación por fotometría de llama y/o absorción atómica.

11. Al³⁺, H⁺; método de Yuan. Extracción con KCl, N.

12. Iones solubles:

- a) Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺ solubles: fotometría de llama y/o absorción atómica.
- b) Cl, Co₃, HCO₃, NO₃ solubles: volumetría y colorimetría, SO₄ turbidimetría con cloruro de Bario.
- c) Boro soluble: extracción con agua, cuantificación con curcumina.
- d) Yeso soluble: solubilización con agua y precipitación con acetona.

Equivalencias:

1 ppm=1 mg/kilogramo

1 milimho (mmho/cm) = 1 decisiemens/metro

1 miliequivalente / 100 g = 1 cmol(+) / kg

Sales solubles totales (TDS) en ppm ó mg/kg = 640 x CEes

CE (1 : 1) mmho/cm x 2 = CE(es) mmho/cm

TABLA DE INTERPRETACION

Salinidad		Materia Orgánica	Fósforo disponible	Potasio disponible	Relaciones Catiónicas			
Clasificación del Suelo	CE(es)	CLASIFICACIÓN	%	ppm P	ppm K	Clasificación	K/Mg	Ca/Mg
*muy ligeramente salino	<2	*bajo	<2.0	<7.0	<100	*Normal	0.2 - 0.3	5 - 9
*ligeramente salino	2 - 4	*medio	2 - 4	7.0 - 14.0	100 - 240	*defc. Mg	>0.5	
*moderadamente salino	4 - 8	*alto	>4.0	>14.0	>240	*defc. K	>0.2	
*fuertemente salino	>8					*defc. Mg		>10

Reacción o pH		CLASES TEXTURALES				Distribución de Cationes %		
Clasificación del Suelo	pH	A	Fr	Ar	Ar.L	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
*fuertemente ácido	<5.5	= arena	= franco	= franco arcillo arenoso	= franco arcillo limoso	=	=	=
*moderadamente ácido	5.5 - 6.0	A,Fr = arena franca	Fr = franco arenoso	Fr,Ar = franco arcillo arenoso	Fr,Ar,L = franco arcillo limoso	=	=	=
*ligeramente ácido	6.1 - 6.5	Fr = franco	Fr = franco	Ar,A = arcilloso arenoso	Ar,A = arcilloso arenoso	=	=	=
*neutro	6.6 - 7.0	Fr,L = franco limoso	Fr,L = franco limoso	Ar,L = arcilloso limoso	Ar,L = arcilloso limoso	=	=	=
*ligeramente alcalino	7.1 - 7.8	L = limoso	L = limoso	Ar = arcilloso	Ar = arcilloso	=	=	=
*moderadamente alcalino	7.9 - 8.4					=	=	=
*fuertemente alcalino	>8.5					=	=	=

Galería fotográfica



Figura 21. Ubicación de la muestra de suelo en Sincos



Figura 22. Extracción de la muestra de suelo en Sincos

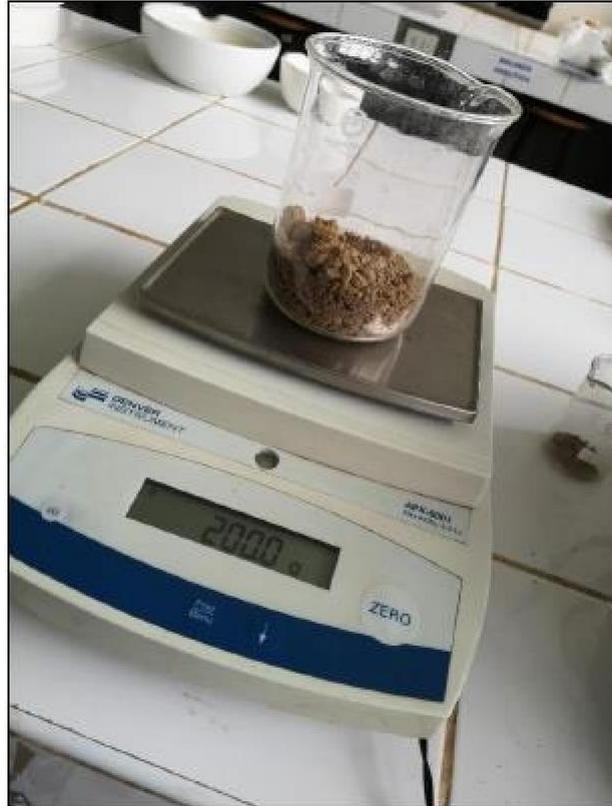


Figura 23. Pesado de la muestra de suelo en Sincos



Figura 24. Preparación de la muestra para tratamiento de calor



Figura 25. Muestras en la mufla para tratamiento de calor



Figura 26. Tratamiento de muestras en la mufla a distintas T°



Figura 27. Muestras después de tratamiento de calor

MATRIZ DE CONSISTENCIA

EFECTO DE LA QUEMA EN LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE UN SUELO AGRÍCOLA EN EL DISTRITO DE SINCOS, JAUJA, 2018

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables e indicadores	Diseño
<p>General: ¿Cuál es el efecto de la quema a T° crecientes, de 0 °C a 400 °C en las propiedades fisicoquímicas de un suelo agrícola de Sincos, Jauja?</p>	<p>General: Determinar el efecto de la quema a T° crecientes, de 0 °C a 400 °C en las propiedades fisicoquímicas de un suelo agrícola de Sincos, Jauja.</p>	<p>General: La quema a T° crecientes, de 0 °C a 400 °C no afecta las propiedades físico - químicas de un suelo agrícola de Sincos, Jauja.</p>	<p>Dependiente: Y = Propiedades fisicoquímicas del suelo</p> <p>Indicadores: Propiedades físicas: contenido de arcilla, limo y arena.</p> <p>Propiedades químicas: pH, CE, P, K, CIC, cationes cambiables y relaciones catiónicas</p> <p>Dimensiones: Alto – Bajo - Medio</p>	<p>Diseño experimental: Diseño Completamente Al Azar (DCA). Prueba de Shapiro – Wilks para determinar la distribución normal de los datos.</p> <p>Análisis de variancia para variables con distribución normal de datos.</p> <p>Prueba de Duncan para comparación múltiple de tratamientos ($\alpha=0,05$).</p>
<p>Específico 1: ¿Cuál es el efecto de la quema a T° crecientes, de 0 °C a 400 °C en la distribución del tamaño de partículas (propiedad física) de un suelo agrícola de Sincos, Jauja?</p>	<p>Específico 1: Describir y comparar el efecto de la quema a T° creciente, de 0 °C a 400 °C en el tamaño de partículas (propiedad física) de un suelo agrícola de Sincos.</p>	<p>Específica 1: La quema afecta significativamente la distribución del tamaño de partículas (propiedad física) de un suelo agrícola de Sincos, Jauja a T° crecientes, de 0 °C a 400 °C.</p>	<p>Independiente: X= Niveles de temperatura</p> <p>Indicador: 100°C, 200°C, 300°C, 400°C</p> <p>Dimensión: °C</p>	<p>Prueba de Kruskall- Wallis para datos de variables no distribuidas normalmente</p>
<p>Específico 2: ¿Cuál es el efecto de la quema a T° crecientes, de 0 °C a 400 °C en el contenido de carbono orgánico, CIC, pH, P, K, cationes cambiables y relaciones catiónicas (propiedades químicas) en un suelo agrícola de Sincos, Jauja?</p>	<p>Específico 2: Describir y comparar el efecto de la quema a T° crecientes, de 0 °C a 400 °C, en el contenido de carbono orgánico, CIC, pH, P, K, cationes cambiables y relaciones catiónicas (propiedades químicas) en un suelo agrícola de Sincos, Jauja.</p>	<p>Específica 2: La quema afecta significativamente las siguientes propiedades químicas: pH, CE, materia orgánica, P, K, CIC, cationes cambiables y relaciones catiónicas, en un suelo agrícola de Sincos, Jauja a temperaturas crecientes, de 0 °C a 400 °C.</p>		