

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN

ESCUELA DE POSGRADO

**Efecto del fuego sobre las propiedades químicas del suelo: evaluación del incendio del 2020 en
sabanas de la ecorregión del Chaco Húmedo, Paraguay**

**Tesis sometida a consideración de la División de Educación y la Escuela de Posgrado
como requisito para optar al grado de**

MAGISTER SCIENTIAE

En Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas

Ana Beatriz Candia Díaz

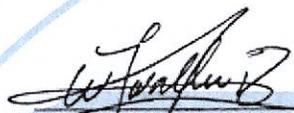
Turrialba, Costa Rica

2023

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero de la estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL
DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

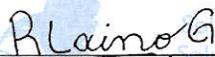
FIRMANTES:



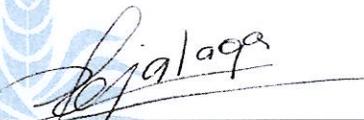
William Jefferson Watler Reyes
William Jefferson Watler Reyes, M.Sc.
Codirector de tesis



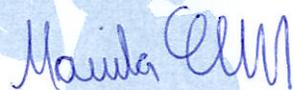
Jimmy Walter Rasche Álvarez, Ph.D.
Codirector de tesis



Rafaela Laino Guanes, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Larissa Rejalaga Noguera, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Mariela Leandro Muñoz, Ph.D.
Decana, a.i., Escuela de Posgrado



Ana Beatriz Candia Díaz
Candidata

Dedicatoria

A mis padres, Rodrigo y Amanda.
A mis hermanas, Susana y Ma. José.
A mis sobrinos, Paula, Rodrigo y Adán.
Este logro, es nuestro.

“El principal objetivo de la educación es crear personas capaces de hacer cosas nuevas,
y no solo repetir lo que otras generaciones hicieron”

Jean Piaget

Agradecimientos

A mis co-directores, William Watler y Jimmy Rasche y a los miembros del comité, Rafaela Laino y Larissa Rejalaga, por el continuo acompañamiento, por las sugerencias, orientaciones y predisposición para que este trabajo haya finalizado con éxito.

Al Proyecto RESTAURAcción financiado por el Gobierno de Canadá, por la beca que me permitió estudiar esta maestría.

Al Centro de Investigación del Chaco Americano, especialmente a Karim Musalem y a Rafaela Laino, sin dejar de mencionar a Don Acosta, Cristian, Dani y a Ña Cata.

Al Área de Suelos y Ordenamiento Territorial de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción por la exoneración de un porcentaje del costo de los análisis de laboratorio y por permitirme el uso de sus instalaciones.

A la profesora Stella Amarilla, por los consejos, la motivación y sugerencias oportunas.

A los profesores Christian Brenes, Eduardo Corrales y Sergio Vílchez, por el soporte, la predisposición y ayuda en el todo el proceso de la tesis.

A Pablo Godoy, por la desinteresada ayuda en la colecta de las muestras de suelo y en el laboratorio.

A mis compañeras de casa, Carmen y Rosanna.

A mis compañeros de la maestría, Paula, Adania y José.

A todos aquellos, que, de alguna u otra manera, fueron parte de este proceso.

Contenido

1. Introducción	1
2. Materiales y Métodos	2
2.1 <i>Área de estudio</i>	2
2.2 <i>Procedimiento metodológico</i>	3
2.2.1 <i>Fase 1</i>	4
2.2.2 <i>Fase 2</i>	6
2.2.3 <i>Fase 3</i>	7
3. Resultados	9
3.1 <i>Mapas de área quemada</i>	9
3.2 <i>Caracterización de los parámetros del suelo</i>	12
<i>Relaciones entre las variables del suelo</i>	15
3.3 <i>Evaluación del efecto del tipo de cobertura, la condición de quema y la profundidad de muestreo sobre las variables químicas del suelo</i>	26
<i>MO</i>	26
<i>P</i>	27
<i>Bases del suelo</i>	27
4. Discusión	28
<i>Mapas de área quemada</i>	28
<i>Variables químicas del suelo</i>	29
<i>pH</i>	29
<i>MO</i>	29
<i>P</i>	30
<i>Bases intercambiables</i>	30
5. Conclusiones	31
6. Referencias Bibliográficas	32
7. Anexos	37

Índice de cuadros

Cuadro 1. Niveles de severidad de quema (dNBR), propuesto por la USGS	6
Cuadro 2. Criterio de clasificación de las variables químicas en niveles.....	7
Cuadro 3. Superficie afectada según los niveles de severidad de quema para el área de estudio en el año 2020, distrito de Benjamín Aceval, ecorregión del Chaco Húmedo, Paraguay	12
Cuadro 4. Correlación entre las variables químicas del suelo para cada factor según tipo de cobertura, la condición de quema y la profundidad de muestreo. Se reportan los coeficientes de correlación de Pearson (r) y los valores de p-valor (p).....	16
Cuadro 5. Variables químicas del suelo y sus interacciones según el tipo de cobertura, la condición de quema y la profundidad de muestreo con estadístico F y valor de p-valor (p)	26
Cuadro 6. Medidas de resumen según tipo de cobertura.....	37
Cuadro 7. Medidas de resumen según condición de quema.....	37
Cuadro 8. Medidas de resumen según profundidad	37

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio, distrito de Benjamín Aceval, ecorregión del Chaco Húmedo, Paraguay.....	3
Figura 2. Esquema del proceso metodológico de la investigación llevada a cabo en el distrito de Benjamín Aceval, ecorregión del Chaco Húmedo, Paraguay.....	4
Figura 3. Mapa de frecuencia acumulada de incendios (2010-2022) del área de estudio, distrito de Benjamín Aceval, ecorregión del Chaco Húmedo, Paraguay.....	9
Figura 4. Mapas de áreas quemadas por año (2010-2022) del área de estudio, distrito de Benjamín Aceval, ecorregión del Chaco Húmedo, Paraguay.....	10
Figura 5. Superficie de área quemada por año para el área de estudio (2010-2022), distrito de Benjamín Aceval, ecorregión del Chaco Húmedo, Paraguay.	11
Figura 6. Mapa dNBR (2020) del área de estudio, distrito de Benjamín Aceval, ecorregión del Chaco Húmedo, Paraguay	12
Figura 7. Medias del pH según tipo de cobertura, condición de quema y profundidad de muestreo.	13
Figura 8. Medias de la MO (%) según tipo de cobertura, condición de quema y profundidad de muestreo.	13
Figura 9. Medias del contenido de P (<i>mg/kg</i>) según tipo de cobertura, condición de quema y profundidad de muestreo	14
Figura 10. Medias de las bases del suelo (Ca, Mg y K en <i>cmolc/kg</i>) según tipo de cobertura, condición de quema y profundidad de muestreo.....	14
Figura 11. Contenido de MO (%) por profundidad de muestreo según la condición de quema.	27
Figura 12. Contenido de P (<i>mg/kg</i>) por profundidad de muestreo según el tipo de cobertura.....	27
Figura 13. Bases del suelo en función de la profundidad de muestreo, expresado en centimoles por kilogramo (<i>cmolc/kg</i>).	28

Lista de acrónimos y abreviaturas

AIC	Criterios de información penalizada de Akaike
ANOVA	Análisis de varianza
BIC	Criterios de información penalizada de Schwartz
Ca	Calcio
DGC	Prueba de comparación de medias de Di Rienzo, Guzmán y Casanoves
dNBR	Índice de Severidad del Fuego
FCA	Facultad de Ciencias Agrarias
FFPRI	Forestry and Forest Products Research Institute
FIRMS	Fire Information for Resource Management System
K	Potasio
Mg	Magnesio
MLM	Modelos lineales y mixtos
MO	Materia orgánica
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MODIS BA	Área Quemada Modis
NBR	Índice de Quemaduras Normalizado
NIR	Infrarrojo cercano
P	Fósforo
pH	Potencial de hidrogeniones
PP	Parcela principal
SP	Sub-parcela
SPP	Sub-sub-parcela
QGIS	Quantum GIS
SWIR	Infrarrojo de onda corta

Unidades de medida

° C	grados centígrados
° ' "	grados minutos segundos
%	porcentaje
cm	centímetros
cmolc/kg	centímol carga por kilogramo
ha	hectárea
km	kilómetro
km ²	kilómetro cuadrado
mg/kg	miligramos por kilogramo

Resumen

El estudio evaluó los cambios por efecto del fuego en el pH, materia orgánica (MO), fósforo (P), bases del suelo (calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K)) dos años después del evento de incendio en los suelos del distrito de Benjamín Aceval, bioma del Chaco Húmedo Paraguayo. Se emplearon índices espectrales en la selección de los sitios de muestreo de área quemada y no quemada. Los factores de tratamiento fueron tipo de cobertura de tierra (sabana y sabana inundada), condición de quema (quema y no quema) y profundidad de muestreo (0-3 y 3-6 cm). Se realizó análisis de correlación de Pearson, para ver las relaciones entre variables químicas del suelo y ANOVA con modelos lineales y mixtos (MLM) para evaluar el efecto de la quema sobre las propiedades químicas del suelo. Se realizó la prueba de comparación de medias de Di Rienzo, Guzmán y Casanoves (DGC) para diferencias significativas. El pH no mostró significancia con ningún factor, ni interacciones. La MO mostró interacción significativa entre cobertura y profundidad de muestreo, el P tuvo interacción entre condición de quema y profundidad de muestreo. En las variables MO y P se encontró efecto significativo con la profundidad de muestreo. Las bases del suelo (Ca, Mg y K) mostraron efecto significativo en la profundidad de muestreo. Dos años después del incendio no se observaron efectos atribuibles al fuego en el pH, MO, P, Ca, Mg y K.

Palabras clave: fuego, propiedades químicas, Chaco Húmedo.

Abstract

The study evaluated the changes of fire effect on pH, organic matter (OM), phosphorus (P), soil bases (calcium (Ca), magnesium (Mg) and potassium (K)) two years after the fire event on soils of the Benjamin Aceval district, Paraguayan Humid Chaco biome. Spectral indices were used in the selection of burned and unburned area sampling sites. Treatment factors were land cover type (savanna and flooded savanna), burning condition (burned and unburned) and sampling depth (0-3 and 3-6 cm). Pearson correlation analysis were performed to perceive the relationships between soil chemical variables and ANOVA with linear and mixed models (MLM) to evaluate the effect of burning on soil chemical properties. Di Rienzo, Guzman and Casanoves (DGC) mean comparison test was used for significant differences. The pH did not show significance with any factor or interactions. MO showed a significant interaction between cover and sampling depth, and P had an interaction between burning condition and sampling depth. In the MO and P variables, only the depth showed a significant effect. Soil bases (Ca, Mg and K) showed a significant effect of sampling depth. Two years after the fire, no effect attributable to fire was observed on pH, OM, P, Ca, Mg and K.

Key Words: fire, chemical properties, Humid Chaco.

1. Introducción

Los incendios forman parte natural en la evolución de los paisajes (Shlisky et al. 2007), en contraste con la creencia inicial de que la distribución mundial de los ecosistemas estaba solo influenciada por el clima y el tipo de suelo. Sin embargo, los incendios también desempeñan un papel crucial (Bond y Keeley 2005, Pausas y Keeley 2009). En la actualidad, los incendios son considerados amenazas para los ecosistemas debido a alteraciones en sus regímenes (frecuencia, severidad, intensidad, estacionalidad, tamaño), causados por la intervención humana (Cochrane y Barber 2009, Doerr y Santín 2016), y el cambio climático (Bento-Gonçalves et al. 2012, Budde et al. 2017).

Latinoamérica presenta uno de los mayores promedios anuales de incendios a nivel mundial (Andela et al. 2017). Estos eventos están en gran medida relacionados con el uso del fuego en actividades agropecuarias, como la deforestación de bosques para habilitar nuevas áreas agrícolas, la eliminación de malezas y rebrote de pasturas en campos de pastoreo, los barbechos agrícolas, entre otras prácticas (Barlow et al. 2020, Armenteras et al. 2021), generando alteraciones significativas en la configuración y composición natural de los paisajes (Neary et al. 2005).

Por lo tanto, las actividades humanas se convierten en los principales agentes de alteración de los regímenes naturales de incendios (Cochrane y Barber 2009). Es importante aclarar que no todos los incendios de origen antrópico son intencionales; aunque los humanos han coexistido con los incendios durante siglos, la manipulación y el dominio del fuego por parte de los humanos continúa siendo negligente (Bowman et al. 2009).

En cuanto a las investigaciones que evalúan las alteraciones en el paisaje como resultados de los incendios, predominan los estudios centrados en la vegetación en comparación con aquellos dirigidos al estudio de las alteraciones en el recurso suelo (Agbeshie et al. 2022). Sin embargo, es importante mencionar que las propiedades del suelo también pueden ser afectadas como resultado de los incendios (Neary et al. 2005, Minervini et al. 2018).

El grado de afectación del suelo posterior al incendio está asociado con factores como la recurrencia, intensidad y severidad del fuego (Bodi et al. 2012), así como la topografía del lugar, los procesos erosivos, la capacidad de regeneración de la vegetación (Caon et al. 2014), el contenido de humedad (Ferreira et al. 2008) y el tipo de suelo (Mataix-Solera et al. 2011). Estas variables contribuyen a que el área afectada se quemara de manera heterogénea, creando mosaicos con diferentes niveles de quema (Rab 1996). A partir de estos mosaicos, se pueden establecer categorías de severidad de quema que, además de servir como indicadores, permiten inferir el grado de degradación de las propiedades del suelo (Vega et al. 2013).

Es relevante destacar que el grado de alteración de las propiedades del suelo está relacionado con la profundidad, siendo común encontrar efectos en los primeros 3 cm, y más evidentes en la camada de 1 a 2 cm (Mallik et al. 1984, Zufiaurre-Galarza et al. 2016). Rara vez, los efectos exceden los 10 cm (Terefe Wondafrash et al. 2005), debido a que los suelos actúan como buenos aislantes térmicos por su baja conductividad térmica (Badía-Villas et al. 2014) y su alta inercia térmica (Sacchi et al. 2015).

La degradación de las propiedades del suelo ocurre como resultado de cambios permanentes o temporales, directos o indirectos, en sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Redin et al. 2011, Zavala et al. 2014). Usualmente, se observan los mayores grados de degradación después de los eventos de incendio, disminuyendo con el paso del tiempo (Giorgis et al.

2021, Orumaa et al. 2022). Las propiedades químicas del suelo sufren cambios luego de los incendios (Mataix-Solera y Guerrero 2007, Bodi et al. 2012), y en general, la concentración total de los elementos químicos no aumenta; en cambio, disminuye o permanece inalterada.

En este contexto, la medición de las alteraciones producidas en las propiedades del suelo como consecuencia de los incendios es fundamental (Ondik et al. 2022), dado que el fuego es uno de los principales responsables de la degradación de este recurso (Terefe Wondafrash et al. 2005).

El objetivo de la investigación fue evaluar el efecto del fuego sobre las propiedades químicas de los suelos dos años después del evento de incendio ocurrido en el año 2020 del distrito de Benjamín Aceval, en la ecorregión del Chaco Húmedo Paraguayo Para lograr el objetivo, se siguieron tres fases; en la primera fase, se identificaron los sitios que representan los factores de estudio utilizando mapas de frecuencia de incendios y de severidad del fuego; en la segunda fase, se recolectó el material (suelo) correspondiente a los factores definidos en la fase anterior, lo que permitió realizar análisis de laboratorio del suelo; en la tercera fase, se realizó el análisis estadístico descriptivo y prueba de hipótesis mediante Análisis de la Varianza (ANOVA) con Modelos Lineales Generales y Mixtos. Se consideró significativo todo aquel efecto con un p-valor $< \alpha$ ($\alpha=0,05$), y en tales casos, se aplicó la prueba de comparaciones múltiples DGC.

La investigación llevada a cabo en el distrito de Benjamín Aceval, ecorregión del Chaco Húmedo Paraguayo, surgió como respuesta a la identificación de dos problemáticas. En primer lugar, se ha presentado un incremento en los eventos de incendios en el Chaco Paraguayo durante los periodos 2001-2010 (Huespe 2010) y 2005-2019 (Coronel et al. 2021). En segundo lugar, existe una escasa cantidad de investigación sobre los efectos a largo plazo de los incendios. Las pocas investigaciones disponibles se basan en reportes de focos de calor (Coronel et al. 2021, Molinas-González y Florentín 2021). Además, la ecorregión tiene una gran importancia ecológica debido a los servicios ecosistémicos que provee (Merenciano González et al. 2018), y su biodiversidad, que incluye especies de anfibios y reptiles (Mereles et al. 2019), una diversidad de fauna silvestre (Laino et al. 2022), y especies en peligro de extinción como la *Panthera onca* (Laino et al. 2021), entre otras.

Se espera que, a partir de los resultados obtenidos, se establezca una línea base de investigación que permita llenar el vacío de información existente y contribuya a la conservación de la calidad del suelo, fundamental para las principales actividades productivas y económicas del departamento.

2. Materiales y Métodos

2.1 Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la ecorregión del Chaco Húmedo Paraguayo (Yanosky et al. 2016), en el Distrito Benjamín Aceval del Departamento de Presidente Hayes. El Departamento comprende una superficie de 72.907 km² y su capital es Villa Hayes. Se encuentra ubicado entre los paralelos 22°00' y 25°00' de latitud Sur, y los meridianos 61°00' y 57°00' de longitud al Oeste de Greenwich. (Dirección General de Estadística 2002). El área de estudio abarca una superficie de 8.085 ha (Figura 1).

El clima en la zona se caracteriza por una precipitación anual que varía entre 1000 y 1200 mm con temperatura promedio de 24 a 25°C. La vegetación predominante en la región es el

mosaico bosque-sabana-palmar-vegetación acuática. Los suelos presentes son mayormente arcillosos, y se encuentran terrenos inundables y anegables, tanto de manera temporal como permanente (Gill et al. 2020).

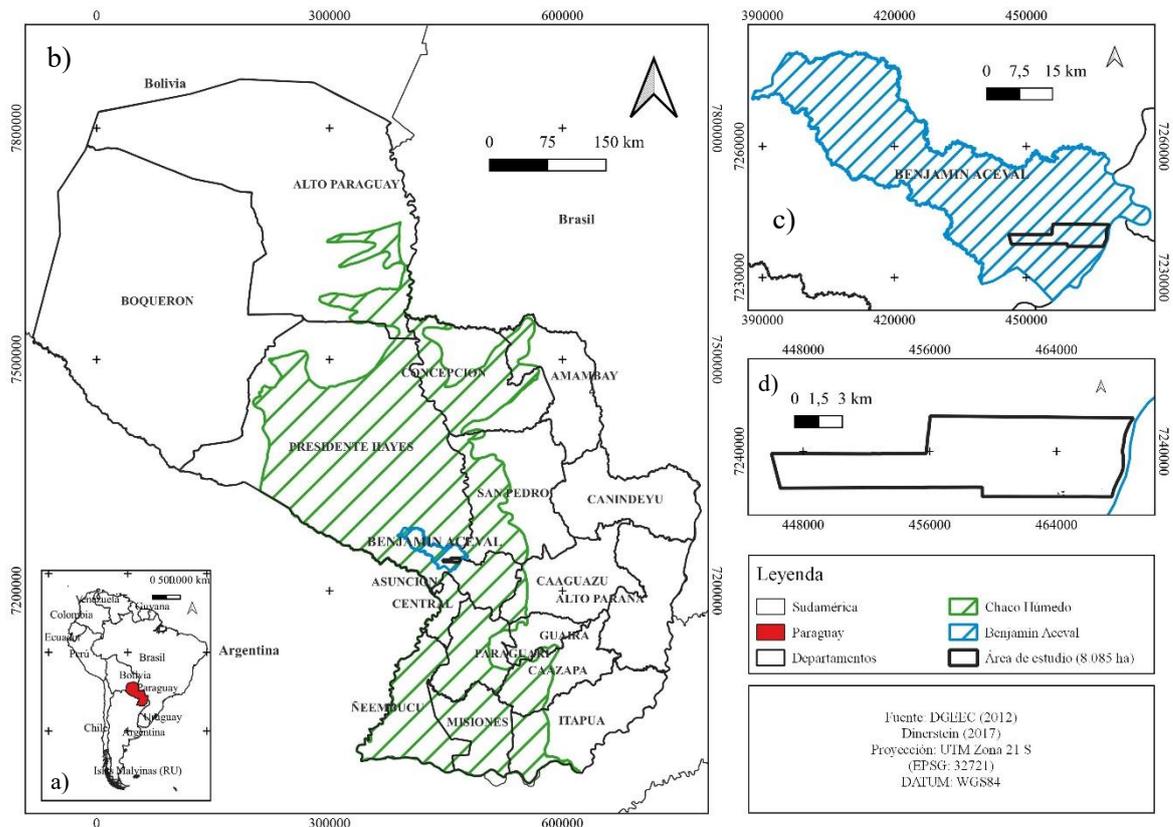


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio, distrito de Benjamín Aceval, ecorregión del Chaco Húmedo, Paraguay. En el gráfico, a) corresponde a la ubicación de Paraguay en América del Sur; b) corresponde a la ubicación de la ecorregión del Chaco Húmedo Paraguayo, c) corresponde a la ubicación del distrito de Benjamín Aceval y d) corresponde a la ubicación del área de estudio

2.2 Procedimiento metodológico

El proceso metodológico fue dividido en tres fases: la primera fase consistió en identificar sitios de muestreo de suelo, en la segunda fase, se tomaron las muestras de suelo que posteriormente fueron analizadas en el laboratorio, y finalmente, en la tercera fase, se procesó la información obtenida y se llevaron a cabo las interpretaciones necesarias para obtener los resultados (Figura 2).

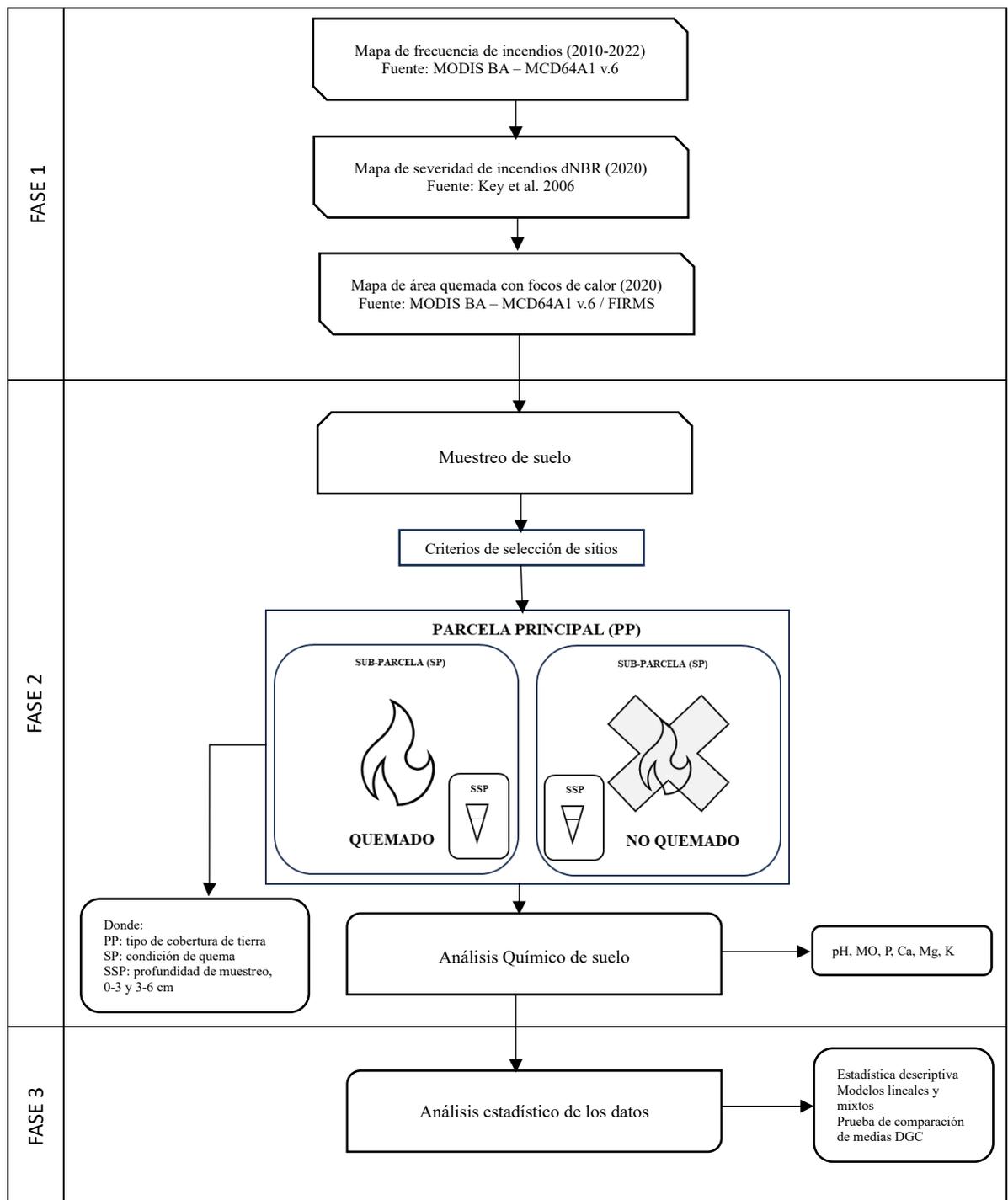


Figura 2. Esquema del proceso metodológico de la investigación llevada a cabo en el distrito de Benjamín Aceval, ecorregión del Chaco Húmedo, Paraguay

2.2.1 Fase 1

Identificación de los sitios de muestreo de suelo

Para identificar los sitios de muestreo de suelo, se realizó un análisis basado en el mapa de frecuencia de incendios para un periodo de 12 años (2010 al 2022). Este mapa se generó utilizando el producto de Área Quemada MODIS (MCD64A1 v. 6), descargado de la

plataforma AppEEARS¹. Con esta información obtenida, se elaboraron mapas binarios por año, donde las áreas quemadas se representaron con valores de 1 y las áreas no quemadas valores de 0. Seguido, utilizando la herramienta calculadora ráster, se sumaron los trece mapas binarios generados, obteniendo el mapa de frecuencia de incendios. Se establecieron criterios de selección para los sitios de muestreo, basados en los rangos de frecuencia de incendios. Estos rangos incluyeron: ocurrencia baja o testigo (0-1), ocurrencia baja (1-3), ocurrencia media (3-6), ocurrencia alta (6-10) y ocurrencia muy alta (10-25). Todos los mapas y análisis fueron realizados utilizando el software QGIS 3.30.

Tras un análisis preliminar, se constató que no existía un patrón claro en el rango de frecuencia de incendios que permitiera identificar y seleccionar sitios homogéneos para el muestreo de suelo en el área de estudio y/o en el área circundante. Debido a esta falta de patrón, se realizó una exploración año por año de los 13 mapas de área quemada inicialmente generados. Como resultado, se logró distinguir que el último gran evento de incendio en el área de estudio ocurrió en el año 2020, abarcando un total 2.730,8 ha quemadas.

Tomando en cuenta la información anterior y considerando que el Índice Espectral, se utiliza de forma estándar para evaluar el efecto del fuego (Key y Benson 2006, Veraverbeke et al. 2010), se decidió emplear el Índice de Severidad de Quema del año 2020 como el mapa base para la selección de los sitios de muestreo de suelo. Este índice está basado en el Índice de Quemaduras Normalizado (NBR por sus siglas en inglés), que evalúa la cicatriz de las quemaduras y el nivel de gravedad de la quema, mediante la combinación de las bandas espectrales de infrarrojo cercano (NIR por sus siglas en inglés) e infrarrojo de onda corta (SWIR por sus siglas en inglés) (Saputra et al. 2017). A continuación, se presenta la ecuación del Índice de Severidad del Fuego (dNBR por sus siglas en inglés):

$$dNBR: \text{Prefuego NBR} - \text{Postfuego NBR}$$

Donde,

Prefuego NBR: corresponde al índice NBR previo del fuego (agosto 2020)

Postfuego NBR: corresponde al índice NBR posterior del fuego (setiembre 2020)

El dNBR emplea una imagen satelital antes de la ocurrencia del incendio y otra imagen después del evento de incendio. Para determinar la fecha del incendio, se utilizaron los puntos de focos de calor correspondiente al año 2020 de la base de datos FIRMS². Por medio de los puntos de focos de calor, se determinó que setiembre reportó la mayor cantidad de focos de calor. Finalmente, se realizó el mapa dNBR para el año 2020 utilizando la imagen satelital del mes de setiembre, y se categorizó según los niveles de severidad de incendios propuesto por la USGS. Todo el procesamiento se realizó en la plataforma Google Engine (Cuadro 1).

1 <https://appeears.earthdatacloud.nasa.gov/>

2 <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>

Cuadro 1. Niveles de severidad de quema (dNBR), propuesto por la USGS

Símbolo	Niveles dNBR	Rango dNBR
	Rebrote alto (pos-fuego)	-500 a -251
	Rebrote medio (pos-fuego)	-250 a -101
	No quemado	-100 a +99
	Baja severidad	+100 a +269
	Moderada – baja severidad	+270 a +439
	Moderada – alta severidad	+440 a +659
	Alta severidad	+660 a +1300

Además, como una forma de validación, se consultó a un actor local, el Señor Acosta, administrador de uno de los establecimientos ubicados dentro del área de estudio, que tiene conocimiento sobre la dinámica histórica de los fuegos en dicha área, de manera a corroborar que la información generada en los mapas coincidía con los datos de conocimiento local.

Asimismo, se elaboró un mapa de cobertura de la tierra para el área de utilizando la metodología propuesta por la FFPRI y la FCA en el año 2013. Las categorías de cobertura de la tierra incluyeron tierra cultivada, sabana, sabana inundable, sabana inundada, cobertura forestal, área urbana y cuerpos de agua.

2.2.2 Fase 2

2.2.2.1 Diseño de muestreo

El objetivo principal del estudio consistió en evaluar el efecto del fuego en las variables químicas del suelo dos años después del evento de incendio. La unidad muestral correspondió a parches de diferentes tamaños seleccionados a partir de los mapas elaborados y tomando en cuenta los factores a evaluar.

2.2.2.2 Estructura de las unidades muestrales

El muestreo de suelo se realizó utilizando el mapa dNBR superpuesto al mapa de cobertura de la tierra para la selección de los parches. Se seleccionaron parches con diferentes tamaños que correspondan al mismo tipo de cobertura de la tierra (parcela principal), además dentro de cada parche, se representó la condición de quema (sub-parcela), y dentro de cada sub-parcela se realizó el muestreo de suelo según la profundidad de muestreo (sub-sub-parcela) (Figura 3).

Otros criterios que se tomaron en cuenta para la selección de los sitios de muestreo fueron el efecto borde de los parches y la distancia entre los sitios muestreados cuando se encontraban dentro del mismo parche. Todas las muestras fueron tomadas a una distancia mínima de 300 m del borde de los parches y en los casos donde se realizaron dos muestreos en un mismo parche, los mismos estuvieron separados a una distancia mínima de 1 km para garantizar la independencia de la información.

2.2.2.3 Estructura de tratamiento

El estudio contó con tres factores de tratamiento; el primero fue el tipo de cobertura de tierra, dividido en dos niveles: sabana y sabana inundada. El segundo factor fue la condición de

quema (quema y no quema). El tercero fue la profundidad de muestreo (0-3 cm y 3-6 cm). Además, se evaluaron las interacciones, entre estos factores.

2.2.2.4 Variables de interés

Las variables químicas del suelo analizadas en este estudio fueron el pH, la materia orgánica (MO), el fósforo (P) y las bases del suelo (calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K)). Para los análisis de suelo, se realizó un muestreo en el cual se tomaron diez submuestras en zigzag, con una distancia fija de 1 m entre cada una, en una superficie de 25 m² (Faria et al. 2015). Luego, las submuestras fueron homogeneizadas en un recipiente para obtener una única muestra compuesta por cada sitio de muestreo.

Las muestras de suelo fueron etiquetadas, georreferenciadas y enviadas al Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias (FCA) de la Universidad Nacional de Asunción (UNA) ubicada en la ciudad de San Lorenzo – Paraguay, para realizar los análisis químicos del pH, MO, K, Ca, Mg y P. Los valores de pH, MO, P, Ca, Mg y K obtenidos analíticamente fueron clasificados en niveles según los criterios de clasificación del Laboratorio de Suelos de la FCA-UNA (Cuadro 2).

Cuadro 2. Criterio de clasificación de las variables químicas en niveles

		Niveles			
		Ácido	Lig. ácido	Neutro	Alcalino
Variables químicas	pH	<5,5	5,6-6,4	6,5-7,4	>7,4
			Niveles		
			Bajo	Medio	Alto
	MO	<1,2	1,2-2,8	>2,8	
	P	<12	12-30	>30	
	Ca	<2,51	2,51-6,0	>6,0	
	Mg	<0,4	0,4-0,8	>0,8	
K	<0,12	0,12-0,17	>0,17		

2.2.3 Fase 3

2.2.3.1 Análisis estadístico de los datos

Como primer paso, antes del análisis de los datos, se realizaron controles para evitar posibles errores, como valores atípicos o inconsistencias, con el fin de garantizar la calidad de los datos y de los resultados posteriores.

Seguidamente, se realizó un análisis de estadística descriptiva para las variables químicas del suelo, que incluyó medidas de resumen y de variabilidad. Estos análisis se llevaron a cabo según el tipo de cobertura, profundidad y condición de quema, con el objetivo de obtener una caracterización general de los datos observados en este estudio. En los resultados se presentan gráficos que permiten comparar entre los diferentes factores, como el tipo de cobertura, la condición de quema y la profundidad de muestreo y, en los anexos se detallan las medidas de resumen para cada variable según el factor correspondiente (Cuadro 6, 7 y 8).

Luego, se estudió la relación entre las variables químicas del suelo mediante el análisis de correlación de Pearson. Se calcularon los coeficientes de correlación y su correspondiente

p-valor para cada par de variables, considerándose como significativas aquellas correlaciones donde el p-valor resulta ser menor a 0,05.

Para determinar el efecto de los factores: tipo de cobertura, condición de quema, profundidad y las interacciones entre ellos, sobre las variables químicas del suelo, se ajustaron modelos lineales generales y mixtos. El modelo base utilizado para el análisis se detalla a continuación:

$$y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \delta_k + \alpha\beta_{ij} + \alpha\delta_{ik} + \beta\delta_{jk} + \alpha\beta\delta_{ijk} + p_{il} + sp_{ijl} + \epsilon_{ijkl}$$

$$i=1,2; j=1,2; k=1,2; l=1,\dots,9$$

Donde,

y_{ijkl} : es la observación de la respuesta del pH, la materia orgánica, el fósforo, el potasio, el calcio y el magnesio.

μ : media general.

α_i : efecto del i -ésimo tipo de cobertura.

β_j : efecto de la j -ésima condición de quema.

δ_k : efecto de la k -ésima profundidad.

$\alpha\beta_{ij}$: efecto de la interacción del i -ésimo tipo de cobertura en la j -ésima condición de quema.

$\alpha\delta_{ik}$: efecto de la interacción del i -ésimo tipo de cobertura en la k -ésima profundidad.

$\beta\delta_{jk}$: efecto de la interacción de la j -ésima condición de quema en la k -ésima profundidad.

$\alpha\beta\delta_{ijk}$: efecto de la interacción del i -ésimo tipo de cobertura en la j -ésima condición de quema y la k -ésima profundidad.

p_{il} : error aleatorio asociado al parche (parcela principal). Además, se distribuye normal, independiente con media cero y varianza homogénea entre parches.

sp_{ijl} : error asociado a la condición de quema dentro del parche (subparcela.) Además, se distribuye normal, independiente con media cero y varianza homogénea entre las condiciones de quema dentro del parche.

ϵ_{ijkl} : error aleatorio asociado al efecto del i -ésimo tipo de cobertura, de la j -ésima condición de quema y la k -ésima profundidad en el l -ésimo parche. Además, se distribuye normal, independiente con media cero y varianza constante.

Además, p_{il} , sp_{ijl} y ϵ_{ijkl} corresponden a los efectos aleatorios de parche, condición de quema dentro del parche (subparcela) y error experimental.

Para evaluar los supuestos distribucionales del error, se utilizaron gráficos de diagnóstico. En aquellos casos donde se sospechó de la falta de cumplimiento de los supuestos, se modelaron los datos declarando diferentes estructuras de correlación de los errores y de varianzas heterogéneas. La selección del mejor modelo se realizó mediante los criterios de información penalizada de Akaike (AIC) y Schwartz (BIC). Finalmente, con el mejor modelo seleccionado, para aquellos factores donde existen diferencias estadísticas significativas ($p < \alpha$, $\alpha = 0,05$) se realizó la prueba de comparación de medias de Di Rienzo, Guzmán y Casanoves (DGC).

Todos los análisis estadísticos fueron realizados con el software InfoStat versión 2017 (Di Rienzo 2017).

3. Resultados

3.1 Mapas de área quemada

El mapa de frecuencia acumulada de incendios del área de estudio para el periodo 2010 a 2022 mostró ocurrencia media (3-6), baja (1-3) y muy baja (0-1) de incendios, siendo 4 la máxima frecuencia de incendios en un mismo píxel. Sin embargo, no se encontró un patrón claro en la frecuencia de incendios que permitiera emplear la frecuencia como criterio para la selección de los sitios de muestreo (Figura 3).

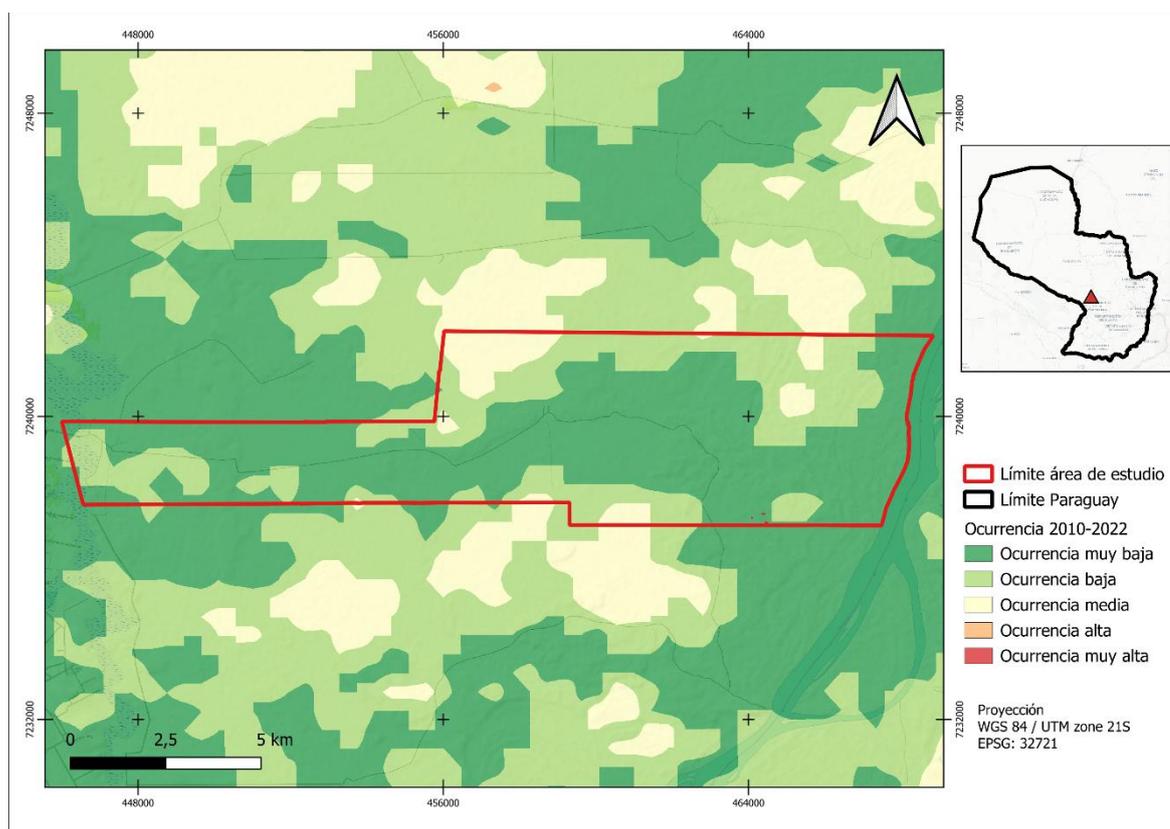


Figura 3. Mapa de frecuencia acumulada de incendios (2010-2022) del área de estudio, distrito de Benjamín Aceval, ecorregión del Chaco Húmedo, Paraguay. Coordenadas: Latitud sur -24,9809, Longitud oeste -57,534 (esquina superior izquierda); Latitud sur -24,934, Lon oeste -57,308 (esquina inferior derecha)

Posteriormente, se realizó una exploración del comportamiento de los incendios en el área de estudio durante el período comprendido entre 2010 y 2022, con el propósito de analizar su evolución a lo largo de estos años. Se observó que, en los años 2010 y 2015, no se produjeron incendios en el área de estudio. Sin embargo, en todos los demás años sí se registraron áreas afectadas por incendios (ver Figura 4).

Este análisis brinda una panorámica general de las tendencias de incendios en la zona de estudio a lo largo del tiempo (2010-2022), lo cual resulta de gran utilidad para comprender la dinámica y los patrones del fuego en esta área. Los resultados obtenidos se revelan como información valiosa para el desarrollo de estrategias de prevención y gestión de las áreas quemadas en la región.

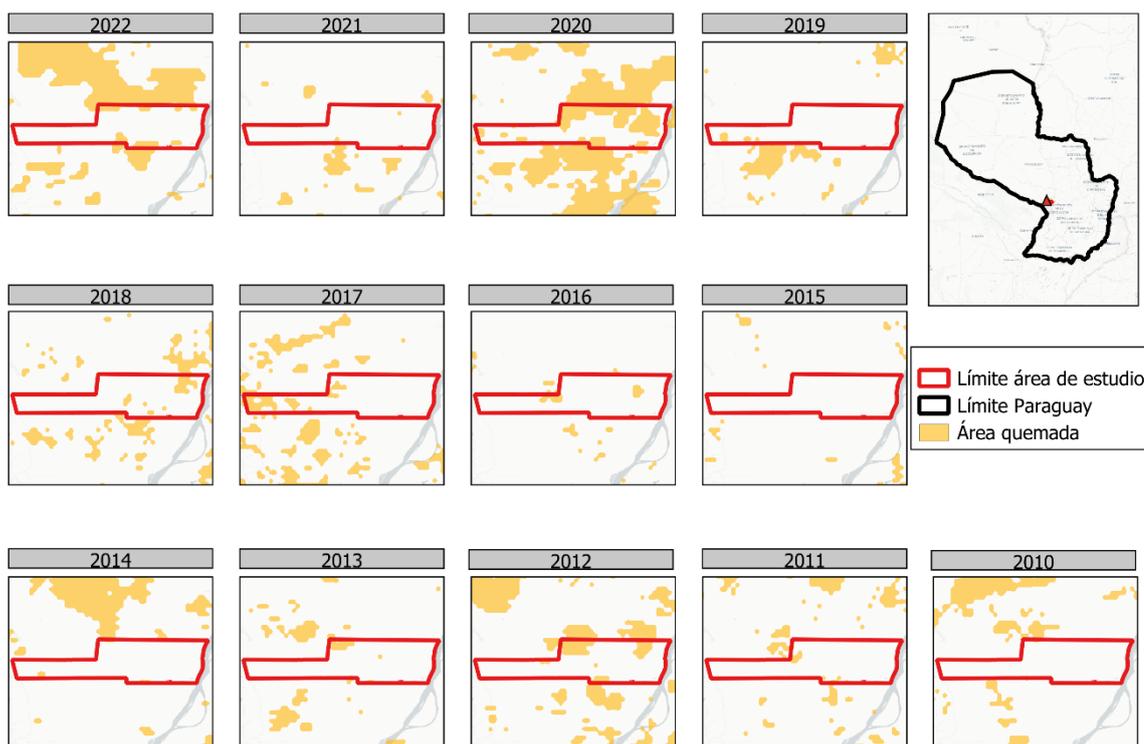


Figura 4. Mapas de áreas quemadas por año (2010-2022) del área de estudio, distrito de Benjamín Aceval, ecorregión del Chaco Húmedo, Paraguay

Se procedió a calcular el área total quemada por año a partir de los mapas de área quemada anuales. Se observó que los años con mayor extensión de áreas quemadas fueron el 2020, 2017 y 2012. Específicamente, el total de superficie quemada en 2020 fue de aproximadamente 2730.8 ha, lo cual representa alrededor de tres veces más del área afectada en los años 2012 (993,0 ha) y 2017 (925,3 ha).

El valor promedio de área quemada en el área de estudio durante el período comprendido entre 2010 y 2022 es de 531,2 ha. No obstante, se observa únicamente en los años 2012, 2017, 2020 y 2022 la superficie quemada fue mayor al promedio de todos los años en estudio (Figura 5).

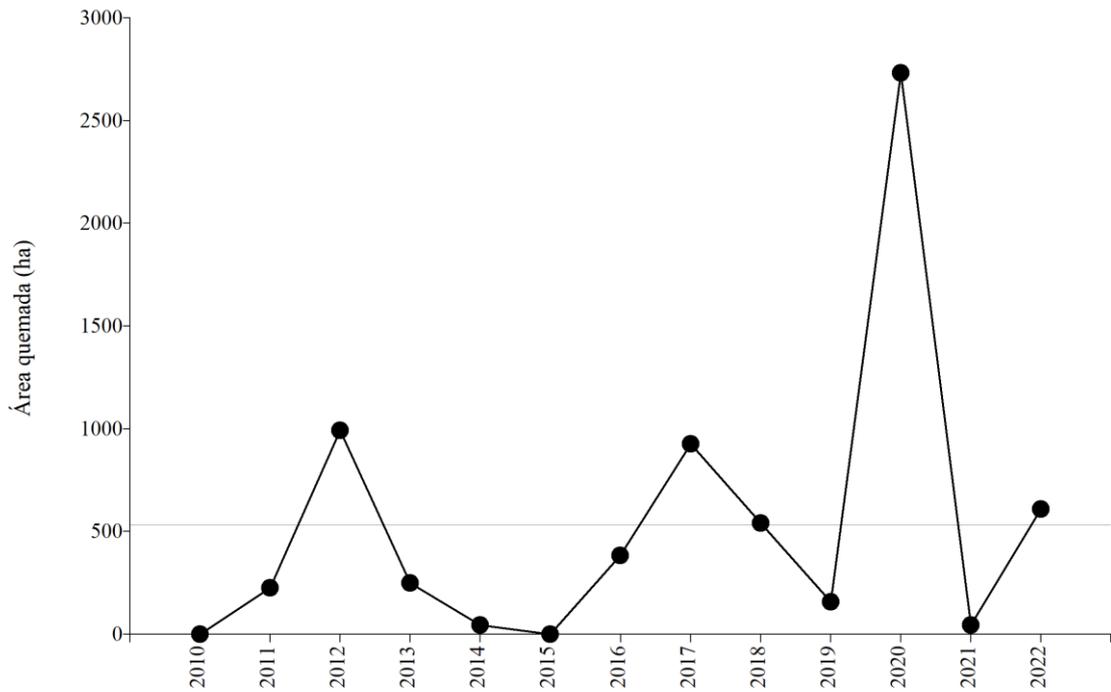
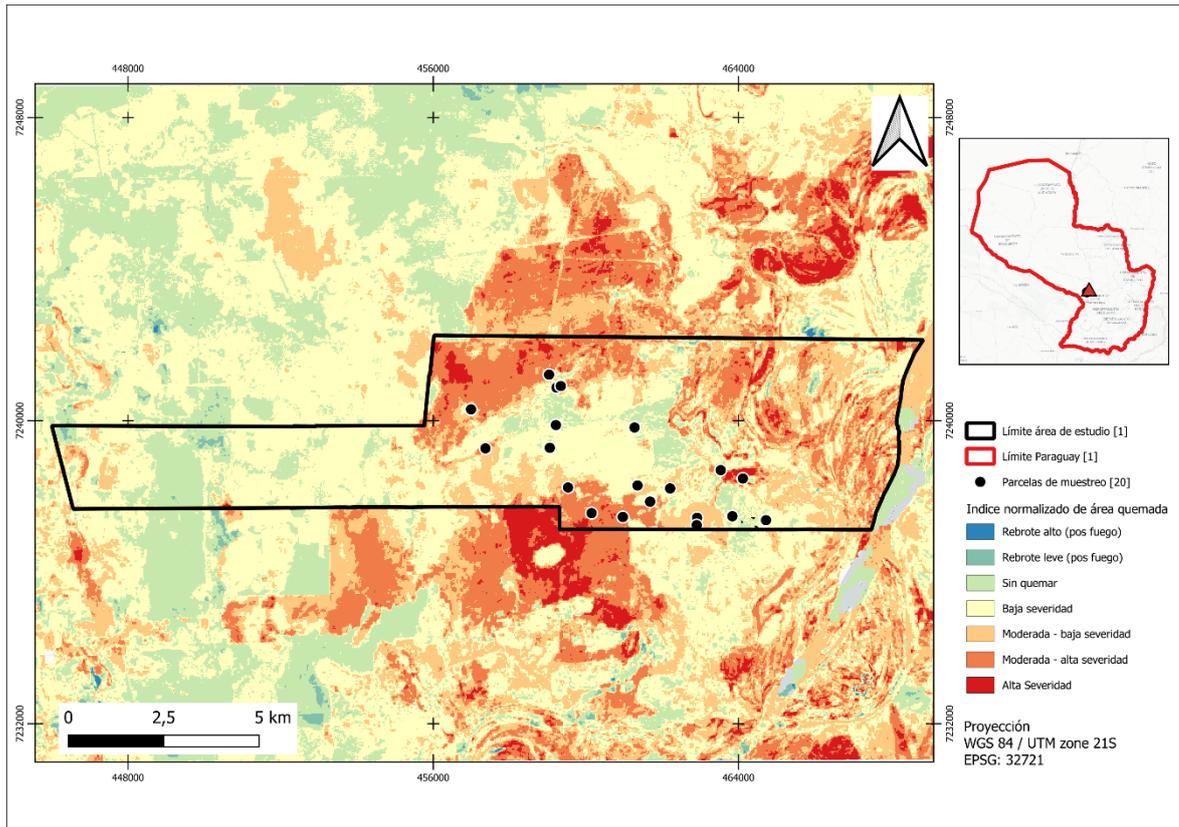


Figura 5. Superficie de área quemada por año para el área de estudio (2010-2022), distrito de Benjamín Aceval, ecorregión del Chaco Húmedo, Paraguay. La línea horizontal de color gris representa al valor promedio de superficie de área quemada para el periodo en estudio

En último lugar, se generó el mapa de dNBR (2020) para la selección de los sitios de muestreo. En este mapa, se identificaron niveles de severidad que van desde rebrote alto hasta alta severidad. Los puntos de coloración azul dentro del mapa representan los sitios de muestreo de suelo (Figura 6).



Con respecto a las extensiones de superficie afectadas por cada nivel de severidad en el evento de incendio, se puede observar que las quemaduras de baja severidad representan el 43% del área total afectada, seguido por los niveles de moderada-baja severidad con un 24% y moderada-alta severidad con un 18%. Estos niveles de severidad predominan en el área analizada. Estos niveles de severidad predominan en el área analizada (Cuadro 3).

Cuadro 3. Superficie afectada según los niveles de severidad de quema para el área de estudio en el año 2020, distrito de Benjamín Aceval, ecorregión del Chaco Húmedo, Paraguay

Niveles dNBR	Superficie afectada (ha)
Rebote alto (pos-fuego)	0,08
Rebote medio (pos-fuego)	28,52
No quemado	987,88
Baja severidad	3.474,81
Moderada-baja severidad	1.949,18
Moderada-alta severidad	1.455,36
Alta severidad	190,04

3.2 Caracterización de los parámetros del suelo

Los valores de pH del suelo no presentaron una diferencia marcada entre el tipo de cobertura, la condición de quema, ni la profundidad de muestreo. La media de los valores de pH para los tres factores se encuentra en un rango de 5,33 a 5,69, lo que demuestra el carácter ácido y ligeramente ácido de los suelos (Figura 7).

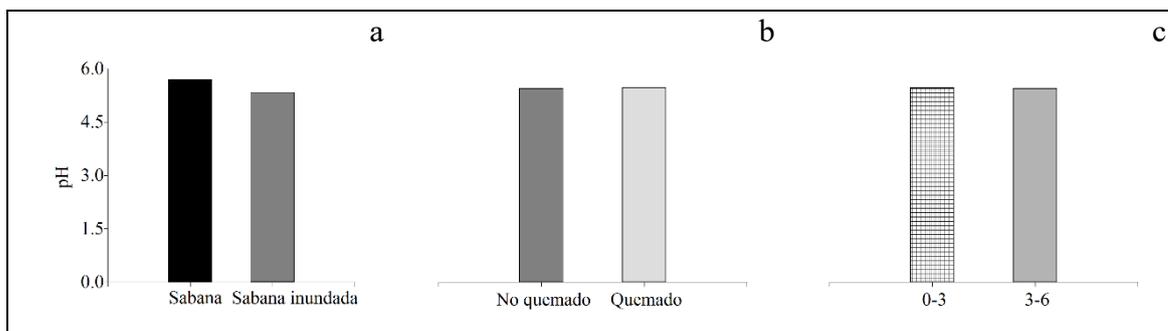


Figura 7. Medias del pH según tipo de cobertura, condición de quema y profundidad de muestreo. En el gráfico la letra a (corresponde a los niveles de pH según el tipo de cobertura), b (corresponde a los niveles de pH según la condición de quema) y c (corresponde a los niveles de pH según la profundidad de muestreo)

Al igual que el pH, el contenido de MO del suelo presentó medias similares para los factores de interés. Los suelos del área de estudio resultaron ricos en MO, debido a su alta concentración que oscila entre el 5,88 a 7,70 % (Figura 8).

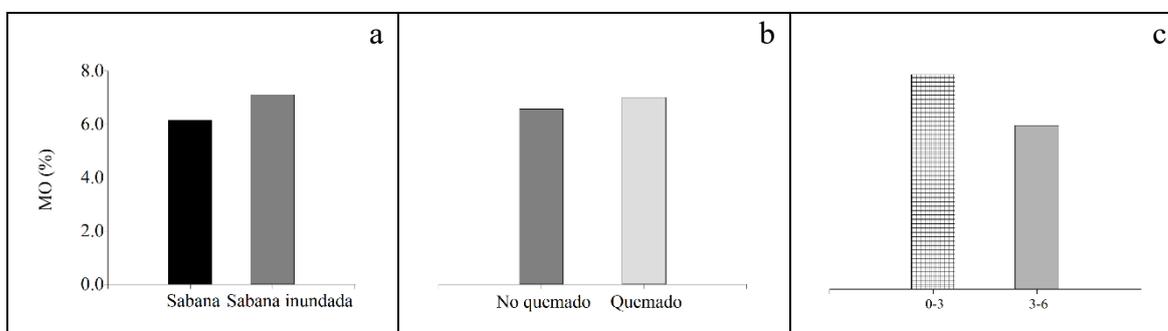


Figura 8. Medias de la MO (%) según tipo de cobertura, condición de quema y profundidad de muestreo. En el gráfico la letra a (corresponde a los niveles de MO según el tipo de cobertura), b (corresponde a los niveles de MO según la condición de quema) y c (corresponde a los niveles de MO según la profundidad de muestreo)

Con respecto al contenido de P en los suelos, las medias para el tipo de cobertura y la condición de quema no presentaron mucha variación (entre 9,09 y 11,93 $\frac{mg}{kg}$). Sin embargo, según la profundidad de muestreo si se observó una marcada diferencia, de 0-3 cm de profundidad el contenido de P es aproximadamente el doble que en la capa más profunda de 3-6 cm, con valores de 13,38 y 7,04 $\frac{mg}{kg}$ respectivamente. En promedio, los suelos del área de estudio presentan niveles medios de P (12 -30 $\frac{mg}{kg}$) en la camada de 0-3 cm y bajos en la camada de 3-6 cm (<12 $\frac{mg}{kg}$), como se muestra en la Figura 9.

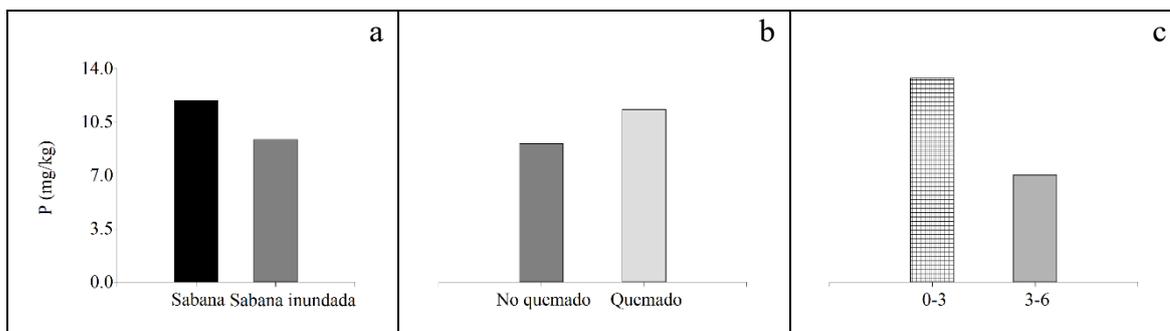


Figura 9. Medias del contenido de P ($\frac{mg}{kg}$) según tipo de cobertura, condición de quema y profundidad de muestreo. En el gráfico la letra a (corresponde al contenido de P según el tipo de cobertura), b (corresponde al contenido de P según la condición de quema) y c (corresponde al contenido de P según la profundidad de muestreo)

En cuanto a las bases del suelo y su relación con el tipo de cobertura, se encontró que el Ca presentó valores medios en su concentración, mientras que el Mg y el K presentaron valores altos en promedio. Al evaluar la condición de quema, se observó que Mg y K mostraron valores altos en su concentración, no así el Ca que, mostró diferencias en sus niveles de concentración, con niveles bajos en suelos no quemados y medios en suelos quemados. De manera similar, se encontraron diferencias en la concentración del Ca según la profundidad de muestreo, con niveles medios en la camada de 0-3 cm y bajos en la camada 3-6 cm. Por otro lado, tanto Mg como K presentaron valores altos tanto para el tipo de cobertura como para la condición de quema, como se puede observar en la Figura 10.

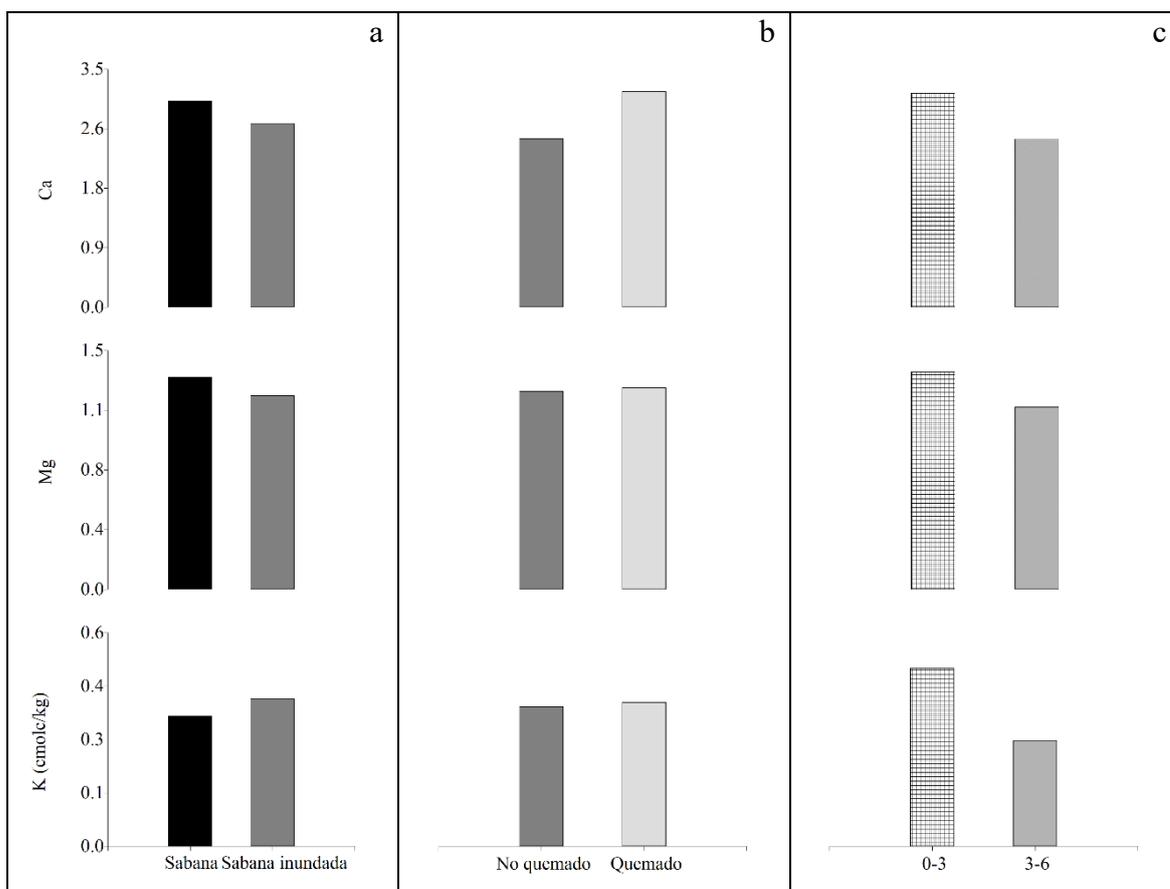


Figura 10. Medias de las bases del suelo (Ca, Mg y K en cmolc/kg) según tipo de cobertura, condición de quema y profundidad de muestreo. En el gráfico la letra a (corresponde al contenido de Ca, Mg y K según la condición el tipo de cobertura), b (corresponde al

contenido de Ca, Mg y K según la condición de quema) y c (corresponde al contenido de Ca, Mg y K según la profundidad de muestreo)

Relaciones entre las variables del suelo

Para explicar las relaciones existentes entre las variables del suelo, se presentan las correlaciones de Pearson entre todos los pares de variables (Cuadro 4).

En el tipo de cobertura sabana, se encontró una correlación significativa positiva entre el pH y los niveles de P, Ca, Mg. Además, se observó una correlación significativa entre el P y el Ca y entre el Ca y el Mg. Por otro lado, en el tipo de cobertura de sabana inundada se encontró una correlación significativa negativa entre el pH y la MO, y una correlación significativa positiva entre la MO y los niveles de P, Mg y Ca, así como entre el P y el Ca y K, entre el Ca con el Mg y entre el Mg con el K.

En cuanto a la condición de quema, se observó una correlación significativa positiva entre el pH y los niveles de P y Ca en los suelos quemados. También, se encontró una correlación significativa entre la MO y el Ca, y entre el Ca con el Mg y el K. En contraste, en los suelos no quemados se detectó una correlación significativa negativa entre el pH con la MO, y correlaciones significativas positivas entre la MO y el P, y entre el Mg con el K.

En cuanto al factor profundidad de muestreo, se detectó la menor cantidad de correlaciones significativas. En la profundidad de 0-3 cm, se presentó una correlación significativa negativa entre el pH con la MO, y una correlación positiva entre el pH y el P, entre el P y el Ca, y entre el Ca con el Mg. Por otro lado, en la profundidad de 3-6 cm, se encontró correlación significativa negativa entre el pH y la MO y correlaciones significativas positivas entre el Ca y el Mg, y entre el Mg y el K.

Cuadro 4. Correlación entre las variables químicas del suelo para cada factor según tipo de cobertura, la condición de quema y la profundidad de muestreo. Se reportan los coeficientes de correlación de Pearson (*r*) y los valores de *p*-valor (*p*)

Variables	Cobertura				Condición de quema				Profundidad (cm)				
	Sabana		Sabana Inundada		Quema		No quema		0-3		3-6		
	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	
pH	MO	-0,51	0,0939	-0,62	0,013	-0,39	0,1109	-0,79	0,0001	-0,56	0,0158	-0,78	0,0001
	P	0,6	0,0393	-0,1	0,6576	0,66	0,0028	-0,11	0,6694	0,57	0,0133	0,01	0,972
	Ca	0,75	0,005	0,18	0,4015	0,49	0,0387	0,28	0,2528	0,41	0,0877	0,36	0,1482
	Mg	0,61	0,0365	-0,0041	0,9848	0,42	0,0797	-0,0046	0,9855	0,09	0,7203	0,35	0,1499
	K	-0,2	0,5301	0,02	0,9179	-0,07	0,7918	-0,14	0,5832	-0,18	0,4695	-0,09	0,7193
MO	P	-0,04	0,8953	0,64	0,0007	0,14	0,5901	0,51	0,0316	0,06	0,8211	0,32	0,1966
	Ca	-0,28	0,3783	0,35	0,0898	0,25	0,313	-0,08	0,7462	0,22	0,3869	-0,14	0,5841
	Mg	-0,18	0,5771	0,41	0,0484	0,38	0,1181	0,01	0,9707	0,31	0,2181	-0,1	0,6943
	Ca	0,11	0,7225	0,51	0,0118	0,56	0,0163	0,26	0,3007	0,28	0,261	0,19	0,4601
P	Ca	0,76	0,0039	0,46	0,0228	0,58	0,0117	0,46	0,0543	0,66	0,003	0,19	0,4489
	Mg	0,49	0,1073	0,28	0,1894	0,52	0,0262	0,04	0,8872	0,41	0,0935	-0,07	0,7859
	K	0,01	0,9693	0,72	0,0001	0,32	0,2025	0,44	0,0669	0,14	0,5817	-0,07	0,7808
Ca	Mg	0,66	0,0203	0,66	0,0005	0,8	0,0001	0,35	0,1500	0,6	0,004	0,64	0,0046
	K	0,14	0,6579	0,52	0,0086	0,52	0,0279	0,28	0,2539	0,37	0,1343	0,24	0,3321
Mg	K	0,28	0,3813	0,57	0,0040	0,43	0,0714	0,51	0,0313	0,21	0,4007	0,67	0,0022

Valores en negrita indican diferencias estadísticas ($p < 0,05$).

3.3 Evaluación del efecto del tipo de cobertura, la condición de quema y la profundidad de muestreo sobre las variables químicas del suelo

Se encontró una interacción significativa entre el tipo de cobertura y la profundidad de muestreo para la MO, y una interacción significativa entre la condición de quema y la profundidad de muestreo para el P. También se encontró un efecto significativo de la profundidad de muestreo en ambas variables (MO y P). En cuanto a las bases del suelo (Ca, Mg y K), solamente se observó un efecto significativo de la profundidad (Cuadro 5).

Cuadro 5. Variables químicas del suelo y sus interacciones según el tipo de cobertura, la condición de quema y la profundidad de muestreo con estadístico F y valor de p-valor (p)

Variables	Términos del modelo						
	Cobertura	Condición	Profundidad	Cobertura* Condición	Cobertura* Profundidad	Condición* Profundidad	Cobertura* Condición* Profundidad
	F p-valor	F p-valor	F p-valor	F p-valor	F p-valor	F p-valor	F p-valor
pH	2,71	0,07	0,15	0,33	0,00	3,65	2,33
	0,1438	0,7965	0,7083	0,5839	>0,9999	0,0769	0,1489
MO	0,61	0,47	35,38	0,55	1,10	4,84	0,02
	0,4613	0,5147	<0,0001	0,4826	0,3122	0,0451	0,8834
P	1,38	2,14	39,06	1,78	4,90	3,21	1,42
	0,2784	0,1870	<0,0001	0,2238	0,0439	0,0949	0,2532
Ca	0,23	0,88	9,18	0,04	4,90E-03	3,04	1,13
	0,6438	0,3796	0,0090	0,8525	0,9450	0,1031	0,3051
Mg	0,44	0,01	28,98	2,10E-03	1,10	2,89	1,15
	0,5270	0,9206	0,0001	0,9649	0,3112	0,1111	0,3011
K	0,62	0,13	16,57	2,92	0,32	0,66	1,84
	0,4577	0,7326	0,0011	0,1313	0,5784	0,4292	0,1963

Valores en negrita indican diferencias estadísticas (p < 0,05).

Por último, para visualizar el comportamiento de los factores significativos en cada una de las variables, se presentan las figuras 11, 12 y 13 correspondientes a la interacción y al factor profundidad.

MO

En cuanto a la MO, se encontró, que, en ambas condiciones de quema, su contenido disminuye al aumentar la profundidad. No obstante, se observa que la MO en suelo no quemado alcanza el mismo nivel que la MO en suelo quemado a una profundidad de 3-6 cm (véase Figura 11).

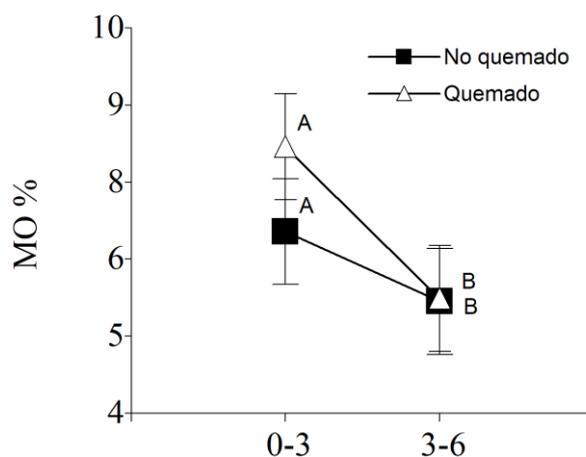


Figura 11. Contenido de MO (%) por profundidad de muestreo según la condición de quema. Medias y error estándar ajustados se obtuvieron de la prueba DGC ($p < 0,05$). Las medias con letras comunes no presentan diferencias significativas

P

En el caso del P, se observó que su contenido es menor en la profundidad de 3-6 cm, independientemente del tipo de cobertura. Además, en esta profundidad, el contenido de P es similar entre los diferentes tipos de cobertura (véase Figura 12).

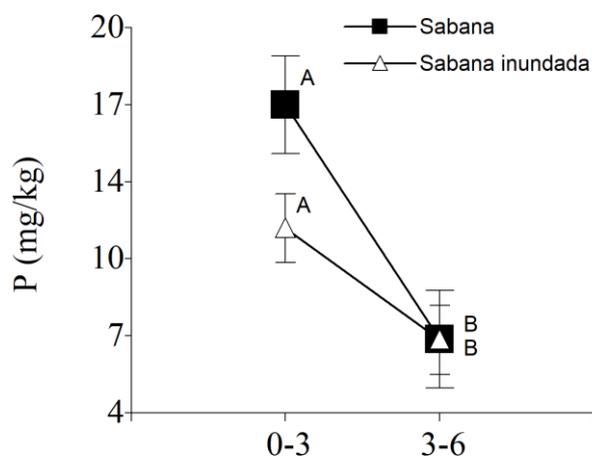


Figura 12. Contenido de P (mg/kg) por profundidad de muestreo según el tipo de cobertura. Medias y error estándar ajustados se obtuvieron de la prueba DGC ($p < 0,05$). Las medias con letras comunes no presentan diferencias significativas

Bases del suelo

En cuanto a las bases del suelo, se destaca un patrón similar en las variables analizadas, donde los valores más altos se encuentran en la profundidad de 0-3 cm en comparación a la profundidad de 3-6 cm, con concentraciones de 3,2 vs 2,5 para Ca; 1,4 vs 1,2 para Mg y 0,5 vs 0,3 cmolc/kg para K (Figura 13).

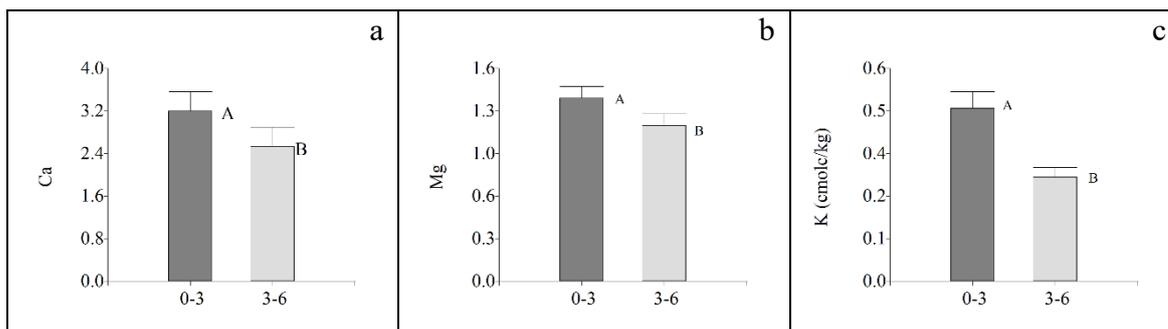


Figura 13. Bases del suelo en función de la profundidad de muestreo, expresado en centimoles por kilogramo (cmolc/kg). Medias y error estándar ajustados se obtuvieron de la prueba DGC ($p < 0,05$). En el gráfico, la letra a (que corresponde al contenido de Ca según la profundidad de muestreo), b (que corresponde al contenido de Mg según la profundidad de muestreo) y c (que corresponde al contenido de Ca, Mg y K según la profundidad de muestreo). Las medias con letras mayúsculas comunes no presentan diferencias significativas

4. Discusión

Mapas de área quemada. El incendio ocurrido en el año 2020 fue el de mayor magnitud en el periodo estudiado, debido a la cantidad de hectáreas quemadas observadas en el área de estudio. A pesar de que la información sobre el origen y la ocurrencia de incendios es muy limitada en Paraguay (Molinas-González y Florentín 2021), la magnitud del incendio de 2020 puede atribuirse a la sequía, la cual aumenta en un 69% el riesgo de ocurrencia de incendios, según Devisscher et al. (2016).

En el Chaco, la sequía es una anomalía transitoria que se acentúa entre los meses de marzo a octubre, debido a que la precipitación media mensual es inferior a 100 mm, e inclusive desciende a 50 mm de junio a septiembre (Pezzoli y Ponte 2016). Durante la temporada de lluvias (octubre-marzo) del año 2020, la precipitación disminuyó en un 57%, para el mes de junio el caudal del río Paraguay se encontraba en la mitad de su nivel habitual, generando en el ambiente sinergias entre condiciones cálidas y secas (Libonati et al. 2020). Lo anterior aunado al hecho de que el área de estudio es adyacente al río Paraguay, sugiere que la sequía del 2020 fue uno de los principales factores que impulsó el drástico evento de incendio ocurrido.

Según proyecciones, los drásticos incendios podrían continuar ocurriendo, especialmente si se presenta la combinación de condiciones meteorológicas favorables para los incendios, como sequías, altas temperaturas y disminución de las precipitaciones (Devisscher et al. 2016, Harrison et al. 2021). Las proyecciones de Bowman et al. (2017) sugieren un aumento del 20% al 50% en los días propicios para eventos extremos de incendios en nuestro hemisferio, se pronostican aumentos en la ocurrencia de incendios. Por lo tanto, resulta fundamental el estudio de la dinámica de los incendios, no solo dentro del área de estudio de esta investigación, sino en todo el país, con el fin de generar información oficial sistematizada de dichos eventos que permitan comprender su comportamiento y, a partir de ello, establecer estrategias de monitoreo y prevención.

Otro punto importante por mencionar es que, con excepción al año 2020, en los demás años prácticamente no se observaron superficies quemadas dentro del área de estudio, se distingue

con claridad que las áreas más afectadas por los incendios se encuentran fuera de la misma. Esto se puede atribuir a la gestión adecuada en el uso del fuego en los pastizales naturales en los establecimientos que forman parte del área de estudio, como la realización de quemas controladas en épocas adecuadas, que consisten por ejemplo en atender las condiciones del viento (velocidad y dirección) para evitar la propagación del fuego, en avisar a los vecinos cuando se realiza la quema, en establecer áreas corta fuego, etc. En las áreas circundantes, donde se observa mayor frecuencia e intensidad de los incendios, probablemente se necesita mejorar el manejo del uso del fuego.

En Paraguay, el uso del fuego en los sistemas ganaderos se amparaba la ley N°4014/2010³ de prevención y control de incendios, la cual no se encontraba reglamentada hasta el año 2021, por lo tanto, se dificultaba su aplicación. Dicha ley ha sido derogada por la ley N°6818/2021⁴, de manejo integral del fuego, esta ley se encuentra reglamentada por el decreto N°7775⁵, y se espera que las nuevas disposiciones planteadas sustenten con mayor robustez el marco legal actual, principalmente en materia de obligaciones, prohibiciones, infracciones y sanciones para quienes emplean de manera inadecuada las quemas.

Variables químicas del suelo. No se encontraron efectos de la acción del fuego sobre el contenido de nutrientes en el suelo, dos años después del evento del incendio. Este resultado difiere con otros estudios realizados en Sudamérica donde los sitios quemados presentaron mayores niveles de pH, mayores concentraciones de P y menores contenidos de MO (Giorgis et al. 2021). Sin embargo, para el caso del Ca, Mg y K, los resultados conciben con otros reportes para suelos tropicales, donde se midieron aumentos efímeros de dichas bases posterior a los eventos de incendios (Certini 2005). Esta disparidad en los resultados obtenidos podría estar relacionada al tiempo transcurrido entre el evento del incendio y el momento de muestreo del suelo (Pereira et al. 2023). En este estudio, los muestreos fueron realizados dos años después del incendio. En general, los mayores efectos se observan inmediatamente después del evento (Köster et al. 2014).

pH. No se detectaron diferencias en el nivel del pH entre suelos quemados y no quemados, este resultado podría deberse al hecho de que los niveles tienden a aumentar, sin embargo, dichos aumentos suelen a ser temporales. Estos resultados concuerdan con otros autores quienes tampoco encontraron diferencias en los niveles de pH pasado cierto tiempo (Etiégni y Campbell 1991, Meira-Castro et al. 2015, Rosales-Rodríguez et al. 2018). Los aumentos en los niveles de pH posterior a la quema están relacionados a la combustión de la MO (Certini 2005) y el depósito de cenizas con altas concentraciones de carbonatos, óxidos y cationes básicos en el suelo (Knicker 2007). Los aumentos efímeros en los niveles de pH podrían darse por procesos de erosión eólica o por lixiviación y arrastre de cationes por las lluvias que ocurren después de los incendios (Rosero Cuesta y Osorio Giraldo 2013). Varios estudios han reportado aumentos transitorios en los niveles de pH. Por ejemplo, Akburak et al. (2018), evaluaron el efecto de las quemas prescritas de baja intensidad en suelos de un bosque de *Quercus frainetto* y encontraron ligeros aumentos de pH en las parcelas quemadas. Del mismo modo, Úbeda et al. (2005) encontraron que el pH aumentó inmediatamente después de la quema en pastizales mediterráneos, pero también repostaron que un año después había vuelto a su nivel inicial.

MO. No se encontró diferencia en el contenido de MO por condición de quema, este hecho también puede estar relacionado con el tiempo transcurrido entre la quema y la toma de

3 https://www.mades.gov.py/wp-content/uploads/2018/07/ley_4014_incendios.pdf

4 <https://bacn.gov.py/archivos/9751/LEY+6818.pdf>

5 <https://bacn.gov.py/archivos/9751/Decreto+7775++Ley+6818.pdf>

muestras de suelo. Los cambios en el contenido de MO son más evidentes inmediatamente después de las quemadas debido a que, de acuerdo a Certini (2005), la MO es la capa del suelo directamente expuesta a la acción del fuego y dependiendo de la severidad del fuego, la MO se destila, carboniza u oxida completamente y se deposita como ceniza en el suelo; el mismo autor también menciona que la diferencia en el contenido de MO se observa unos pocos meses después de las quemadas. Por otro lado, la diferencia en su concentración en las distintas profundidades si era de esperarse, debido a que la camada superficial de los suelos está expuesta a una mayor entrada de MO por deposición de restos de plantas y residuos orgánicos, y además su descomposición es más rápida por las mejores condiciones de oxígeno y temperatura que producen una mayor actividad biológica. Estos hallazgos concuerdan con Simon et al. (2016), quienes tampoco encontraron diferencia significativa entre los niveles de MO en suelos quemados y no quemados, pero sí encontraron diferencias según la profundidad de muestreo, la capa superficial de 0-5 cm mostró mayor disponibilidad de MO en comparación con la capa de 5-10 cm. Del mismo modo, Faria et al. (2015) encontraron evidencias de cambios en la calidad y cantidad de MO en la capa superior del suelo quemado en comparación con los no quemados en plantaciones de eucalipto, dichas diferencias disminuyeron durante los 24 meses posteriores al incendio.

P. No se encontró diferencia significativa en la concentración de P entre suelos quemados y no quemados, independientemente del tipo de cobertura. Este resultado podría deberse a la disolución del P presente en la ceniza y la mineralización de P orgánico, que se produce luego de las quemadas y transforman el P no disponible a formas disponibles como los iones de ortofosfato Knicker (2007) y Badía y Martí (2003). Sin embargo, al aumentar la disponibilidad de P, también aumenta la posibilidad de su precipitación en forma de minerales. De acuerdo a Badía et al. (2013), la precipitación de P se da por la unión de este con el Ca soluble en los suelos (la concentración de Ca también tiende a aumentar en los suelos por efecto del calentamiento del suelo), formando fosfatos de calcio no disponibles. No obstante, lo anterior no concuerda con los resultados de Úbeda et al. (2005), quienes encontraron que además del aumento de P después de la quema, en las mediciones realizadas un año después del evento de incendio el contenido de P aumentó aún más. Por otra parte, es previsible que se encuentre un mayor contenido de P en la superficie del suelo en comparación con las capas más profundas, debido a que el P puede ingresar al suelo a través de diferentes fuentes externas, como la descomposición de materia orgánica, la aplicación de fertilizantes y la incorporación de residuos vegetales y, estas fuentes tienden a estar más concentradas en la superficie del suelo, lo que resulta en un mayor contenido de P en dicha camada. El enriquecimiento de P disponible está limitado principalmente a los primeros 3 cm de profundidad del suelo Badía et al. (2013).

Bases intercambiables. La mayor concentración de Ca, Mg y P encontrada en la camada de 0-3 cm puede asociarse a la ocurrencia de mayor entrada de MO y actividad de las raíces que se da en superficie del suelo que produce una mayor retención y reciclaje de estos nutrientes- Además, la continua descomposición de la MO libera gradualmente estos nutrientes a la superficie del suelo y también los aportes externos como la fertilización mineral. Con respecto a la condición de quema, no se encontraron diferencias significativas. Estos resultados coinciden con varios trabajos que reportaron aumentos efímeros en las concentraciones de estas bases e incluso tres meses o un año después del evento del incendio sus concentraciones volvieron a las iniciales (Certini 2005, Akburak et al. 2018). Igualmente, Simon et al. (2016) reportan que no hubo interacción entre quema y profundidad para Ca y Mg, pero sí para K, que presentó mayor disponibilidad en la profundidad de 0-5 cm en comparación con la de 5-10 cm. No obstante, estos resultados discrepan de los de Badía et al. (2013), quienes encontraron que la concentración de estas bases aumenta significativamente en los suelos quemados después de una semana de ocurrido el incendio

forestal, e incluso, en la evaluación realizada un año después del evento, se encontró una alta acumulación de estas bases, pero solo en los primeros centímetros superiores del suelo.

5. Conclusiones

Los mapas analizados revelaron que el incendio ocurrido en el año 2020 fue el de mayor magnitud en el período estudiado. Con la escasa información sobre el origen y la ocurrencia de incendios en Paraguay, se podría definir a la sequía ocurrida en el 2020 como principal causante del incendio de esa magnitud. Las proyecciones indican que eventos extremos de incendios podrían seguir ocurriendo si persisten las condiciones de sequías, altas temperaturas y reducción de las precipitaciones.

No se encontraron diferencias significativas en las concentraciones de nutrientes en el suelo que pudieran atribuirse al efecto del fuego después de dos años del evento del incendio.

La escasa información disponible sobre varios factores que inciden significativamente en la capacidad del suelo para retener nutrientes en el área quemada como las tasas de erosión y escorrentía, la precipitación y el manejo de los campos, entre otros, limita las inferencias que se puedan realizar sobre los resultados obtenidos. Por lo tanto, se necesitan estudios adicionales que consideren estos factores de manera a obtener una comprensión más completa sobre los hallazgos de la investigación.

Resulta crucial seguir investigando la dinámica de los incendios en el área de estudio y en todo el país, para generar información sistematizada que permita abordar adecuadamente el desafío de mitigar y manejar los incendios en el futuro.

6. Referencias Bibliográficas

- Agbeshie, AA; Abugre, S; Atta-Darkwa, T; Awuah, R. 2022. A review of the effects of forest fire on soil properties (en línea). *Journal of Forestry Research* :23. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01475-4>.
- Akburak, S; Son, Y; Makineci, E; Çakir, M. 2018. Impacts of low-intensity prescribed fire on microbial and chemical soil properties in a *Quercus frainetto* forest. *Journal of Forestry Research* 29(3):687-696. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0486-4>.
- Andela, N; Morton, DC; Giglio, L; Chen, Y; Van Der Werf, GR; Kasibhatla, PS; DeFries, RS; Collatz, GJ; Hantson, S; Kloster, S; Bachelet, D; Forrest, M; Lasslop, G; Li, F; Mangeon, S; Melton, JR; Yue, C; Randerson, JT. 2017. A human-driven decline in global burned area. *Science* 356(6345):1356-1362. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aal4108>.
- Armenteras, D; Meza, MC; González, TM; Oliveras, I; Balch, JK; Retana, J. 2021. Fire threatens the diversity and structure of tropical gallery forests. *Ecosphere* 12(1). DOI: <https://doi.org/10.1002/ecs2.3347>.
- Badía-Villas, D; González-Pérez, JA; Aznar, JM; Arjona-Gracia, B; Martí-Dalmau, C. 2014. Changes in water repellency, aggregation and organic matter of a mollic horizon burned in laboratory: Soil depth affected by fire (en línea). *Geoderma* 213:400-407. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.038>.
- Badia, D; Marti, C. 2003. Plant ash and heat intensity effects on chemical and physical properties of two contrasting soils. *Arid Land Research and Management* 17(1):23-41. DOI: <https://doi.org/10.1080/15324980390169046>.
- Badía, D; Martí, C; Aguirre, AJ; Aznar, JM; González-Pérez, JA; De la Rosa, JM; León, J; Ibarra, P; Echeverría, T. 2013. Wildfire effects on nutrients and organic carbon of a Rendzic Phaeozem in NE Spain: Changes at cm-scale topsoil (en línea). *Catena* 113:267-275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.08.002>.
- Barlow, J; Berenguer, E; Carmenta, R; França, F. 2020. Clarifying Amazonia's burning crisis. *Global Change Biology* 26(2):319-321. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14872>.
- Bento-Gonçalves, A; Vieira, A; Úbeda, X; Martin, D. 2012. Fire and soils: Key concepts and recent advances (en línea). *Geoderma* 191:3-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.01.004>.
- Bodi, MB; Cerdà, A; Mataix-Solera, J; Doerr, SH. 2012. Efectos de los incendios forestales en la vegetación y el suelo en la cuenca mediterránea: Revisión bibliográfica (en línea). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* (58):33-55. DOI: <https://doi.org/10.21138/bage.2058>.
- Bond, WJ; Keeley, JE. 2005. Fire as a global 'herbivore': the ecology and evolution of flammable ecosystems. 20(7). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.04.025>.
- Bowman, DMJS; Balch, JK; Artaxo, P; Bond, WJ; Carlson, JM; Cochrane, MA; D'Antonio, CM; DeFries, RS; Doyle, JC; Harrison, SP; Johnston, FH; Keeley, JE; Krawchuk, MA; Kull, CA; Marston, JB; Moritz, MA; Prentice, IC; Roos, CI; Scott, AC; Swetnam, TW; Van Der Werf, GR; Pyne, SJ. 2009. Fire in the earth system (en línea). *Science* 324:481-484. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1163886>.
- Bowman, DMJS; Williamson, GJ; Abatzoglou, JT; Kolden, CA; Cochrane, MA; Smith, AMS. 2017. Human exposure and sensitivity to globally extreme wildfire events (en línea). *Nature Ecology and Evolution* 1(3):1-6. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41559-016-0058>.
- Budde, KB; González-Martínez, SC; Navascués, M; Burgarella, C; Mosca, E; Lorenzo, Z; Zabal-Aguirre, M; Vendramin, GG; Verdú, M; Pausas, JG; Heuertz, M. 2017. Increased fire frequency promotes stronger spatial genetic structure and natural selection at regional and local scales in *Pinus halepensis* Mill. :1061-1072. DOI:

- <https://doi.org/10.1093/aob/mcw286>.
- Caon, L; Vallejo, VR; Coen, RJ; Geissen, V. 2014. Effects of wildfire on soil nutrients in Mediterranean ecosystems (en línea). *Earth-Science Reviews* 139:47-58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.09.001>.
- Certini, G. 2005. Effects of fire on properties of forest soils: A review. *Oecologia* 143(1):1-10. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8>.
- Cochrane, MA; Barber, CP. 2009. Climate change, human land use and future fires in the Amazon. *Global Change Biology* 15(3):601-612. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01786.x>.
- Coronel, G; Partén, M; Breuer, N; Celeste, A; Rejalaga, L; Monte Domecq, F; Nagy, GJ. 2021. Wildfires in Paraguay: Environmental and Humans Impacts. *In Leal Filho, W; Freitas Setti, AF; Miranda Azeiteiro, U (eds.)*. Hamburg, Germany, s.e. p. 429-444 DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-76624-5_26.
- Devisscher, T; Anderson, LO; Aragão, LEOC; Galván, L; Malhi, Y. 2016. Increased wildfire risk driven by climate and development interactions in the Bolivian Chiquitania, Southern Amazonia. *PLoS ONE* 11(9). DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161323>.
- Dirección General de Estadística, E y C. 2002. Atlas Censal del Paraguay: Pdte. Hayes. :199-205.
- Di Rienzo, JA; Macchiavelli, R; Casanoves, F. 2017. Modelos Lineales Mixtos InfoStat. s.l., s.e. 253 p.
- Doerr, SH; Santín, C. 2016. Global trends in wildfire and its impacts: Perceptions versus realities in a changing world. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 371(1696). DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0345>.
- Etiégni, L; Campbell, AG. 1991. Physical and chemical characteristics of wood ash. *Bioresource Technology* 37(2):173-178. DOI: [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(91\)90207-Z](https://doi.org/10.1016/0960-8524(91)90207-Z).
- Faria, SR; De La Rosa, JM; Knicker, H; González-Pérez, JA; Villaverde, J; Keizer, JJ. 2015. Wildfire-induced alterations of topsoil organic matter and their recovery in Mediterranean eucalypt stands detected with biogeochemical markers. *European Journal of Soil Science* 66(4):699-713. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.12254>.
- Ferreira, AJD; Coelho, COA; Ritsema, CJ; Boulet, AK; Keizer, JJ. 2008. Soil and water degradation processes in burned areas: Lessons learned from a nested approach. *Catena* 74(3):273-285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.05.007>.
- Gill, EA; Da Ponte, E; Insfrán, KP; González, LR. 2020. Atlas of the Paraguayan Chaco. s.l., s.e. 98 pp p.
- Giorgis, MA; Zeballos, SR; Carbone, L; Zimmermann, H; von Wehrden, H; Aguilar, R; Ferreras, AE; Tecco, PA; Kowaljow, E; Barri, F; Gurvich, DE; Villagra, P; Jaureguiberry, P. 2021. A review of fire effects across South American ecosystems: the role of climate and time since fire (en línea). *Fire Ecology* 17(11):20. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42408-021-00107-2>.
- Harrison, SP; Prentice, IC; Bloomfield, KJ; Dong, N; Forkel, M; Forrest, M; Ningthoujam, RK; Pellegrini, A; Shen, Y; Baudena, M; Cardoso, AW; Huss, JC; Joshi, J; Oliveras, I; Pausas, JG; Simpson, KJ. 2021. Understanding and modelling wildfire regimes: An ecological perspective (en línea). *Environmental Research Letters* 16(12):125008. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac39be>.
- Huespe, H. 2010. Estimación de superficie quemada en Paraguay por tipo de Ecirregión y por Departamento para el periodo 2001-2010. Tesis de grado. Universidad Nacional de Asunción.
- Knicker, H. 2007. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review. *Biogeochemistry* 85(1):91-118. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-007-9104-4>.

- Key, CH; Benson, NC. 2006. Landscape Assessment (LA) sampling and analysis methods (en línea). s.l., USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Ogden, UT. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/241687027_Landscape_Assessment_Ground_measure_of_severity_the_Composite_Burn_Index_and_Remote_sensing_of_severity_the_Normalized_Burn_Ratio.
- Köster, K; Berninger, F; Lindén, A; Köster, E; Pumpanen, J. 2014. Recovery in fungal biomass is related to decrease in soil organic matter turnover time in a boreal fire chronosequence (en línea). *Geoderma* 235-236:74-82. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.07.001>.
- Laino, R; Musalem, K; Laino, LD; Caballero-Gini, A; Bueno-Villafañe, D; Aranda, L; Esquivel, A; Riveros, MF; Nardelli, LR; Cantero, N; Irala, R. 2022. Islands of Forests Among Savannas: Key Elements for Conservation and Production in the Paraguayan Humid Chaco. :185-205. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-92234-4_8.
- Laino, R; Musalem, K; Weiler, A; González–Maya, JF. 2021. Roaming among humans: noteworthy records of jaguar (*Panthera onca*) close to human settlements in the Paraguayan Humid Chaco. *Arxius de Miscellania Zoologica* 19:197-204. DOI: <https://doi.org/10.32800/amz.2021.19.0197>.
- Libonati, R; DaCamara, CC; Peres, LF; Sander de Carvalho, LA; Garcia, L. 2020. Rescue Brazil's burning Pantanal wetlands. *Nature* 588. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/d41586-020-03464-1>.
- Mallik, AU; Gimingham, C; Rahman, A. 1984. Ecological effects of heather burning (en línea). *Journal of Ecology* 72(3):767-776. Disponible en <http://www.jstor.org/stable/2259530>.
- Mataix-Solera, J; Cerdà, A; Arcenegui, V; Jordán, A; Zavala, LM. 2011. Fire effects on soil aggregation: A review (en línea). *Earth-Science Reviews* 109(1-2):44-60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.08.002>.
- Mataix-Solera, J; Guerrero, C. 2007. Efectos de los incendios forestales en las propiedades del suelo. (en línea). *Cuaderno activa* :5-40. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Jorge-Mataix-Solera/publication/229187257_Efectos_de_los_incendios_forestales_en_las_propiedades_edaficas/links/0fcfd500835635e07c000000/Efectos-de-los-incendios-forestales-en-las-propiedades-edaficas.pdf.
- Meira-Castro, A; Shakesby, RA; Espinha Marques, J; Doerr, SH; Meixedo, JP; Teixeira, J; Chaminé, HI. 2015. Effects of prescribed fire on surface soil in a *Pinus pinaster* plantation, northern Portugal. *Environmental Earth Sciences* 73(6):3011-3018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3516-y>.
- Mereles, MF; Céspedes, G; Cartes, JL; Goerzen, R; Egea-Elsam, J De; Rodríguez, L; Yanosky, A; Villalba, L; Weiler, A; Cacciali, P. 2019. Biological Corridors as a Connectivity Tool in the Region of the Great American Chaco: Identification of Biodiversity Hotspots in the Ecoregions of the Paraguayan Chaco. *Research in Ecology* 2(1):27-36. DOI: <https://doi.org/10.30564/re.v2i1.1324>.
- Merenciano González, AM; Musálem, K; Laino, R; Rey Benayas, JM; Cruz-Alonso, V; El Raiss Cordero, Z; Brun Moreno, V; Chaparro Otazu, P; Lubián Valenzuela, A; González, JD; Amarilla, S; Aranda Espinoza, ML; Enciso, C. 2018. Ecosystem services in the Paraguayan Humid Chaco: challenges for ecosystem-based management. *Ecosistemas* 27(2):115-125. DOI: <https://doi.org/10.7818/ECOS.1531>.
- Minervini, M; Morrás, H; Taboada, M. 2018. Efectos del fuego en la matriz del suelo. Consecuencias sobre las propiedades físicas y mineralógicas (en línea). :12-27. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.25260/EA.18.28.1.0.127>.
- Molinas-González, CR; Florentín, P. 2021. Incendios forestales en Paraguay : implicaciones

- para su prevención y manejo. *Investigaciones y Estudios - UNA* (12):47-57. DOI: <https://doi.org/10.47133/ieuna2115>.
- Neary, DG; Ryan, KC; Deban, LF; Landsberg, JD; Brown, JK. 2005. Introduction (en línea). s.l., s.e. p. 17. Disponible en <http://digitalcommons.unl.edu/jfspsynthesishttp://digitalcommons.unl.edu/jfspsynthesis/18>.
- Ondik, MM; Bennell, M; Davies, RJP; Ooi, MKJ; Muñoz-Rojas, M. 2022. Fire and land use impact soil properties in a Mediterranean dry sclerophyll woodland. *Journal of Environmental Management* 324(July). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116245>.
- Orumaa, A; Agan, A; Anslan, S; Drenkhan, T; Drenkhan, R; Kauer, K; Köster, K; Tedersoo, L; Metslaid, M. 2022. Long-term effects of forest fires on fungal community and soil properties along a hemiboreal Scots pine forest fire chronosequence. *Science of the Total Environment* 851(August). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158173>.
- Pausas, JG; Keeley, JE. 2009. A Burning Story : The Role of Fire in the History of Life. 59(7):593-601. DOI: <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.7.10>.
- Pereira, JS; Badía, D; Martí, C; Mora, JL; Donzeli, VP. 2023. Fire effects on biochemical properties of a semiarid pine forest topsoil at cm-scale. *Pedobiologia* 96(December). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2022.150860>.
- Pezzoli, A; Ponte, E. 2016. Vulnerability and Resilience to Drought in the Chaco, Paraguay. s.l., s.e. p. 63-88 DOI: <https://doi.org/10.1515/9783110480795-005>.
- Rab, MA. 1996. Soil physical and hydrological properties following logging and slash burning in the Eucalyptus regnans forest of southeastern Australia (en línea). 84:159-176. DOI: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0378-1127\(96\)03740-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0378-1127(96)03740-1).
- Redin, M; de Franceschi dos Santos, G; Miguel, P; Luís Denega, G; Lupatini, M; Doneda, A; Lorensi de Souza, E. 2011. Impactos Da Queima Sobre Atributos Químicos, Físicos E Biológicos Do Solo (en línea). *Ciência Florestal* 21(2):381-392. Disponible en <https://periodicos.ufsm.brhttps://doi.org/10.5902/198050983243>.
- Rosales-Rodríguez, JA; Esquivel-Segura, EA; Acevedo-Tapia, MA; González-Ortega, M; Cartes-Rodríguez, E. 2018. Situación pre y post-incendio, de un ecosistema del tipo forestal Roble-Hualo, Región del Maule, Chile. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 16(38):55-68. DOI: <https://doi.org/10.18845/rfmk.v16i38.3997>.
- Rosero Cuesta, J; Osorio Giraldo, I. 2013. Efectos de los incendios forestales en las propiedades del suelo. Estado del arte (en línea). *Cuaderno Activa* 5(1):11. DOI: <https://doi.org/10.21774/ing.v7i16.264>.
- Sacchi, G; Campitelli, P; Soria, P; Ceppi, S. 2015. Influencia de temperaturas de aquecimiento sobre as propiedades físicas e químicas de solos com diferente material parental e uso antrópico. *Spanish Journal of Soil Science* 5(3):214-226. DOI: <https://doi.org/10.3232/SJSS.2015.V5.N3.03>.
- Saputra, AD; Setiabudidaya, D; Setyawan, D; Khakim, MYN; Iskandar, I. 2017. Burnscar analysis using normalized burning ratio (NBR) index during 2015 Forest fire at merang-kepahyang peat forest, South Sumatra, Indonesia. *AIP Conference Proceedings* 1857. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4987107>.
- Shlisky, A; Waugh, J; González, P; González, M; Manta, M; Santoso, H; Alvarado, E; Ainuddin, A; Rodríguez-trejo, DA; Swaty, R; Schmidt, D; Kaufmann, M; Myers, R; Alencar, A; Kearns, F; Johnson, D; Smith, J; Zollner, D. 2007. Fire, ecosystems and people : threats and strategies for global biodiversity conservation (en línea). *The Nature Conservancy Global Fire Initiative Technical Report* 2:17. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/259657820_Fire_ecosystems_and_people_threats_and_strategies_for_global_biodiversity_conservation.
- Simon, CA; Ronqui, MB; Roque, CG; Desenso, PAZ; Souza, MAV; Kühn, IE; Camolese,

- HS; Simon, CP. 2016. Efeitos da Queima de Resíduos do Solo Sob Atributos Químicos de um Latossolo Vermelho Distrófico do Cerrado. *Nativa* 4(4):217-221. DOI: <https://doi.org/10.14583/2318-7670.v04n04a06>.
- Terefe Wondafrash, T; Mariscal Sancho, I; Gomez Miguel, V; Espejo Serrano, R. 2005. Relationship between soil color and temperature in the surface horizon of Mediterranean soils: A laboratory study. *Soil Science* 170(7):495-503. DOI: <https://doi.org/10.1097/01.ss.0000175341.22540.93>.
- Úbeda, X; Lorca, M; Outeiro, LR; Bernia, S; Castellnou, M. 2005. Effects of prescribed fire on soil quality in Mediterranean grassland (Prades Mountains, north-east Spain). *International Journal of Wildland Fire* 14(4):379-384. DOI: <https://doi.org/10.1071/WF05040>.
- Vega, JA; Fontúrbel, T; Merino, A; Fernández, C; Ferreiro, A; Jiménez, E. 2013. Testing the ability of visual indicators of soil burn severity to reflect changes in soil chemical and microbial properties in pine forests and shrubland (en línea). *Plant and Soil* 369:73-91. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1532-9>.
- Veraverbeke, S; Lhermitte, S; Verstraeten, W; Goossens, R. 2010. Assessing burn severity using satellite time series. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 137(May):107-118. DOI: <https://doi.org/10.2495/FIVA100101>.
- Yanosky, A; Weiler, A; Mereles, F; Helman, G; Campos, JM; Batrina, L; Arévalos, M. 2016. *Ecorregiones del Paraguay*. s.l., s.e.
- Zavala, LM; De Celis, R; Jordán, A. 2014. How wildfires affect soil properties. A brief review. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 40(2):311-332. DOI: <https://doi.org/10.18172/cig.2522>.
- Zufiaurre-Galarza, R; Fernández Campos, M; Badía-Villas, D; Armas-Herrera, CM; Martí-Dalmau, C; Girona-García, A. 2016. Immediate changes in topsoil chemical properties after controlled shrubland burning in the Central Pyrenees. *18(2012):18329*.

7. Anexos

Cuadro 6. Medidas de resumen según tipo de cobertura

Cobertura	Variables	Medidas de Resumen					
		Media	Desviación Estándar	Mediana	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo
Sabana	pH	5,69	0,49	5,55	8,52	5,10	6,60
	Materia orgánica	6,14	2,12	5,75	34,46	3,89	11,44
	Fósforo	11,93	7,98	9,60	66,92	3,89	31,99
	Calcio	3,03	1,14	2,69	37,50	1,80	5,99
	Magnesio	1,33	0,28	1,34	20,81	0,94	1,74
	Potasio	0,37	0,18	0,30	49,04	0,16	0,82
Sabana inundada	pH	5,33	0,37	5,30	6,92	4,50	6,10
	Materia orgánica	7,11	2,50	6,76	35,09	3,15	11,93
	Fósforo	9,35	4,90	8,43	52,45	3,08	22,21
	Calcio	2,70	1,44	2,29	53,21	1,10	6,98
	Magnesio	1,22	0,37	1,20	30,58	0,55	1,84
	Potasio	0,41	0,19	0,38	45,16	0,13	0,79

Cuadro 7. Medidas de resumen según condición de quema

Condición de quema	Variables	Medidas de Resumen					
		Media	Desviación Estándar	Mediana	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo
No quemado	pH	5,44	0,47	5,45	8,55	4,50	6,10
	Materia orgánica	6,57	2,34	6,02	35,66	3,61	11,93
	Fósforo	9,09	5,13	7,14	56,39	3,08	22,21
	Calcio	2,47	0,63	2,45	25,66	1,40	3,89
	Magnesio	1,24	0,29	1,28	23,16	0,72	1,76
	Potasio	0,39	0,19	0,36	48,73	0,13	0,82
Quemado	pH	5,46	0,42	5,40	7,77	5,10	6,60
	Materia orgánica	7,01	2,49	6,82	35,47	3,15	11,44
	Fósforo	11,33	6,93	9,14	61,15	4,75	31,99
	Calcio	3,16	1,74	2,83	55,14	1,10	6,98
	Magnesio	1,27	0,40	1,23	31,60	0,55	1,84
	Potasio	0,41	0,18	0,38	44,72	0,16	0,79

Cuadro 8. Medidas de resumen según profundidad

Profundidad de muestreo	Variables	Medidas de Resumen					
		Media	Desviación Estándar	Mediana	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo
0-3	pH	5,46	0,42	5,40	7,72	4,80	6,60
	Materia orgánica	7,70	2,56	7,43	33,17	3,15	11,93
	Fósforo	13,38	6,80	11,92	50,79	5,62	31,99
	Calcio	3,15	1,42	2,83	45,16	1,30	6,98
	Magnesio	1,37	0,31	1,42	22,70	0,79	1,84
	Potasio	0,50	0,19	0,46	38,91	0,16	0,82
3-6	pH	5,44	0,47	5,40	8,60	4,50	6,50
	Materia orgánica	5,88	1,86	5,50	31,73	3,15	9,71
	Fósforo	7,04	3,08	6,55	43,70	3,08	16,04
	Calcio	2,48	1,19	2,14	48,22	1,10	6,38
	Magnesio	1,14	0,35	1,01	30,44	0,55	1,69
	Potasio	0,30	0,10	0,28	33,32	0,13	0,50

