



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE QUINTANA ROO

DIVISIÓN DE DESARROLLO SUSTENTABLE

Efecto de la quema de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*)
en la concentración y distribución de metales pesados (Fe, Al,
Mn, Cu, Cr, Pb) en un suelo Gleysol de la zona sur del Estado de
Quintana Roo.

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

LICENCIADO EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES

PRESENTA

MARCOS ANTONIO MARTÍNEZ VARGAS

DIRECTOR DE TESIS

Dra. PATRICIA FRAGOSO SERVÓN

ASESORES

Dr. ALBERTO PEREIRA CORONA

M.C. JAIME ALFREDO CASTILLO RODRIGUEZ

M.C. BENITO PREZAS HERNANDEZ

Dra. JENNIFER DENISSE RUIZ RAMÍREZ



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, SEPTIEMBRE DE 2023



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE QUINTANA ROO

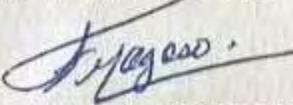
DIVISIÓN DE DESARROLLO SUSTENTABLE

TESIS ELABORADA BAJO LA SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DE
TESIS DEL PROGRAMA DE LICENCIATURA Y APROBADA
COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

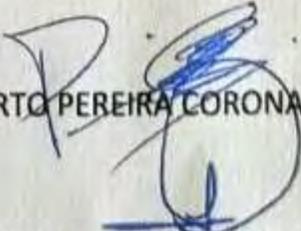
LICENCIADO EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES

COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR:


DRA. PATRICIA FRAGOSO SERVÓN

ASESOR:


DR. ALBERTO PEREIRA CORONA

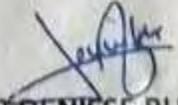
ASESOR:

M. C. JAIME ALFREDO CASTILLO RODRIGUEZ

ASESOR:


M.C. BENITO PREZAS HERNANDEZ

ASESOR:


DRA. JENNIFER DENISSE RUIZ RAMÍREZ



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, SEPTIEMBRE DE 2023

Dedicatoria

A mi abuela Victoria Vázquez Vitela, este logro también es de usted ♥.

A los que se nos adelantaron y hoy no están en este mundo terrenal pero que sin duda alguna nos dejaron grandes enseñanzas, siempre estarán en mi corazón.

Agradecimientos

A mis padres por apoyarme siempre, por ser siempre esos pilares en mi vida, gracias por todo lo que me han enseñado, ustedes serán siempre mis mejores maestros, a mis hermanos y en general a toda mi familia por siempre estar pendiente de mí.

A mi novia Chan Lidia, por ser siempre esa motivación, por estar siempre apoyándome y guiándome para lograr concluir esta etapa universitaria, todo ha valido la pena, hoy ambos somos egresados de la UQROO.

A don Oscar Valdez y su esposa Antonia Chan, por ser como unos segundos padres en esta etapa, gracias por todo el apoyo que me dieron durante los últimos años de estudio.

A mi gran amiga Esmeralda por siempre estar apoyándome en temas que no comprendía, sin duda una de esas amistades que hace que la vida de foráneo no sea difícil.

A la Dra. Patricia Fragoso por confiar en mi para la realización de este trabajo y sobre todo el conocimiento que me compartió.

Al laboratorio de Ecología y Ordenamiento Territorial por prestarme sus instalaciones para la realización de mis análisis.

A la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo por darme las herramientas para ser un mejor profesional, gracias por todos esos viajes de práctica que sin duda alguna fueron de gran ayuda en la licenciatura.

Índice

1.	Antecedentes	12
1.1	El suelo	12
1.2.	Historia del cultivo de caña de azúcar.....	12
1.3.	Uso de fertilizantes y herbicidas en el cultivo de caña de azúcar.	14
1.4.	Ventajas y desventajas de la quema de caña de azúcar.	16
1.5.	Metales pesados.	19
2.	Justificación del problema:.....	22
3.	Pregunta de investigación:.....	22
4.	Objetivo general:.....	22
5.	Objetivos particulares:.....	22
6.	Área de estudio.....	23
7.	Metodología:.....	25
8	Resultados:.....	27
8.1.	Temperatura:.....	27
8.2.	Color:.....	27
8.3.	Textura:.....	27
8.4.	pH.....	28
8.5.	Metales pesados:.....	28
8.5.1.	Hierro.....	29
8.5.2.	Manganeso.....	31
8.5.3.	Cobre.....	33
8.5.4.	Plomo.....	35
8.5.5.	Cromo.....	36
8.5	Aluminio.....	38
8.6	Comportamiento y distribución de Fe, Mn, Cu, Pb, Cr y Al antes y después de la quema.....	39
8.7	Análisis estadísticos.....	40
9	Discusión.....	42
10	Conclusiones:.....	46
11	Bibliografía.....	47

Índice de cuadros.

Cuadro 1. Concentraciones de MP antes y después de la quema.....	28
Cuadro 2. Análisis de varianza.....	41

Índice de figuras

Figura 1. Área de estudio. Parcela "El Zapote", Othón P. Blanco, Quintana Roo. Elaboración propia.	23
Figura 2. Gráfica de concentraciones de Fe pre y posquema.....	30
Figura 3. Gráfica de distribución de Fe de pre y posquema.....	31
Figura 4. Gráfica de concentraciones de Mn en pre y posquema.....	32
Figura 5. Gráfica de distribución de Mn en pre y posquema.....	33
Figura 6. Gráfica de concentraciones de Cu en pre y posquema.....	33
Figura 7. Gráfica de distribución de Cu en pre y posquema.....	34
Figura 8. Gráfica de concentraciones de Pb en pre y posquema.....	35
Figura 9. Gráfica de distribución de Pb en pre y posquema.....	36
Figura 10. Gráfica de concentraciones de Cr en pre y posquema.....	37
Figura 11. Gráfica de distribución de Cr en pre y posquema.....	37
Figura 12. Gráfica de concentraciones de Al en pre y posquema.....	38
Figura 13. Gráfica de distribución de Al en pre y posquema.....	39
Figura 14. Gráficas de distribución de Fe, Mn, Cu, Pb, Cr Al en pre y posquema	40

Resumen

El uso del fuego en la agricultura ha sido importante en la limpieza de terrenos para la siembra de futuros cultivos o quema de follajes como en el caso de los cultivos de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), esta última actividad ha generado muchas opiniones a favor y en contra, para los agricultores genera beneficios al momento del corte y transporte de materia prima, al suelo le aporta macro y micronutrientes; sin embargo, al quemar los cañaverales se produce una gran cantidad de humo y cenizas que pueden llegar a afectar a personas, animales o cuerpos de agua cercanos, además de estimular el surgimiento de nuevas plagas en las zonas de cultivo. El objetivo de este trabajo fue analizar la distribución y concentración de (Fe, Al, Mn, Cu, Cr, Pb) posterior a la quema controlada en un suelo de la zona cañera de Quintana Roo. Se realizaron dos muestreos en un suelo Eutric Gleysol (Clayic, Vertic) cultivado con caña de azúcar en el lapso de un ciclo reproductivo, el primero se llevó a cabo cuando el cultivo alcanzó su máximo desarrollo y el segundo después de la quema y cosecha de este. Se midió la temperatura alcanzada en el suelo durante la quema y la temperatura superficial. En el laboratorio se pesó un gramo de suelo por cada muestra y se realizaron ciclos de digestión ácida en un horno de microondas a 200°C por 20 minutos, la concentración total de cada uno de los elementos fue por espectrofotometría de absorción atómica por aspiración directa. Los resultados obtenidos se sometieron a un análisis de comparación de medias pre y post quema por profundidad y un análisis de varianza. Durante la quema se registraron temperaturas en la superficie del suelo por encima de los 200°C, con valores máximos de 500 °C, en el perfil del suelo se produjeron cambios en las pinturas térmicas en los primeros 5 cm de profundidad. Se encontraron cambios en las concentraciones y distribución de Fe, Mn, Cu, Pb, Cr, Al; solo fueron significativos los cambios en los primeros 2 cm de profundidad para Mn, y de 10 a 12 cm para el Al. Los resultados obtenidos en esta investigación nos evidencian que los efectos de la quema tienen efecto en los primeros 5 cm de profundidad, derivado de ello se observan los pequeños cambios en la distribución de las concentraciones de los elementos estudiados.

Palabras clave: Suelo, Quema controlada, Caña.

Introducción.

La quema controlada es la aplicación controlada del fuego, se toman en cuenta factores como la dirección del viento y condiciones climatológicas, en la agricultura es una práctica común, es usado como control de maleza, regeneración de pastizales u obtención de carbón (Alvarado, 2007).

En los cultivos de caña de azúcar se realizan varias quemas, la primera se realiza con el objetivo de eliminar cobertura vegetal, aumentar la calidad de la materia prima y que el corte y recolección de tallos sea más fácil, la segunda quema se realiza sobre el material vegetal que quedo sobre la superficie después de la zafra para permitir el rebrote y ahijamiento de la plantación (Rivera-Cruz et al., 2017).

Los metales pesados son elementos químicos cuya densidad es mayor a 5 g/ml, algunos de ellos son esenciales para los organismos (Calva y Torres, 2004), estos elementos pueden ser incorporados en suelos agrícolas por el uso de fertilizantes, plaguicidas o herbicidas.

Actualmente existen investigaciones de los efectos benéficos y de las amenazas que representa la quema controlada en plantaciones de caña de azúcar; sin embargo, son casi nulas aquellas que traten sobre los efectos de la concentración de los metales pesados en el suelo y su distribución después de la quema.

La presente investigación tiene por objetivo analizar la distribución y concentración total de (Fe, Al, Mn, Cu, Cr, Pb) antes y posterior a la quema controlada en un suelo Gleysol presente en la zona cañera del sur del estado de Quintana Roo.

1. Antecedentes

1.1 El suelo

El suelo es un recurso natural no renovable cuyo proceso de formación conlleva cientos de años (SEMARNAT, 2015), es resultado de la intervención de actores activos (clima y organismos vivos) que repercuten sobre factores pasivos (roca madre y relieve), independientemente del tiempo transcurrido, la mayoría de éstos están formados por horizontes o capas definidos por el color, textura, estructura, contenido en materia orgánica, presencia de carbonatos y sales solubles (INEGI, 2014). El análisis de las características morfológicas, físicas, químicas y biológicas de este recurso nos permite conocer aspectos como drenaje, penetración de raíces, contenido de nutrientes, así como la cantidad de arena y arcilla, características que nos indicarán el uso y manejo que el suelo debe tener (INEGI, 2004).

Entre las principales funciones del suelo podemos mencionar que es el recurso que proporciona el ciclo de nutrientes primarios para la vida vegetal y animal, actúa como una base para la alimentación, mitiga el cambio climático a través del secuestro de carbono y la reducción de emisión de gases de efecto invernadero, además, es una fuente importante de combustibles fósiles y alberga la cuarta parte de la diversidad biológica del planeta (FAO, 2015), también es parte fundamental en el equilibrio de los ecosistemas, funcionando como filtro y/o amortiguador al retener sustancias y transformar compuestos orgánicos descomponiéndolos consiguiendo la mineralización (SEMARNAT, 2015).

1.2. Historia del cultivo de caña de azúcar

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) es una gramínea tropical originaria de Nueva Guinea, es un cultivo de larga duración, por tanto, es viable que se desarrolle en cualquier temporada del año; sin embargo, las condiciones ideales para obtener excelentes rendimientos serían un ambiente soleado y caluroso prolongado, con alta incidencia de radiación solar y adecuada precipitación (CONADESUCA, 2015). El cultivo de caña de azúcar consta de 5 etapas fenológicas y puede variar de 14 a 17 meses de acuerdo con la temperatura, humedad y luminosidad del lugar donde se encuentre ubicada la plantación (SADER, 2019).

La primera fase es la germinación y emergencia que se da entre los 7 y 10 días posteriores a la siembra, de los 10 a los 40 días se da el amacollamiento que consiste en el brote de varios tallos a partir de las articulaciones nodales ubicadas en los tallos primarios. La etapa de crecimiento rápido de la planta es caracterizada por la formación y estiramiento de la caña hasta alcanzar su máxima área foliar. La maduración de la caña tiene una duración de 2 a 3 meses, es aquí cuando existe el proceso de síntesis y acumulación de sacarosa en los tallos de la caña. Por último, se realiza la cosecha que se suele llevar a cabo entre los 11 y 16 meses de la plantación y ocurre cuando los tallos ya dejaron de desarrollar, las hojas se marchitan y caen. Antes de cosechar es común quemar la plantación para eliminar las malezas que impiden el corte de la caña y posibles plagas. La zafra se realiza a mano o con maquinaria para su traslado a los ingenios (SADER, 2019).

El cultivo de la caña de azúcar en México comenzó en el año de 1522, cuando Hernán Cortez trasladó plantas desde Cuba, en algunos estudios se menciona que dos años después ya había cañaverales a orillas del río Tepengo en Tuxtla, Veracruz. A partir de ese momento el cultivo comenzó a expandirse hacia otros estados de la república mexicana como fueron Jalisco, Michoacán y Puebla en donde las tierras eran fértiles y las condiciones climáticas y edafológicas eran inmejorables (Hernández et al. 2013).

Actualmente se cultiva en 15 entidades federativas, Campeche, Chiapas, Colima, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, San Luis Potosí, Sinaloa, Tabasco, Tamaulipas y Veracruz (SAGARPA, 2018). Cabe mencionar que los ingenios han sido parte fundamental en el desarrollo de las diferentes zonas cañeras, en un principio eran antiguas haciendas coloniales americanas que se dedicaban a obtener productos como azúcar, ron y alcohol, a lo largo del territorio mexicano se encuentran distribuidos 51 ingenios azucareros, es decir plantas industriales dedicadas al procesamiento y transformación exclusivamente de la caña de azúcar.

Los principales subproductos de la industria azucarera son la melaza y el bagazo. La melaza es la materia prima para la producción de alcohol, el bagazo es usado

como materia prima en la industria del papel, además, la cogeneración de energía eléctrica usándolo como combustible en calderas para los ingenios azucareros (Romero et al, 2012).

1.3. Uso de fertilizantes y herbicidas en el cultivo de caña de azúcar.

De acuerdo con Ibarra et al., (2015) y Hernández et al., (2017), las plantaciones cañeras en secano, en el estado de Veracruz, son más vulnerables a las condiciones climáticas y en particular a la lluvia porque el estrés hídrico es el factor que más limita al cultivo. Según Martín et al., (2007) y Hernández et al., (2017) el requerimiento hídrico varía, lo que conlleva a una extracción considerable de nutrientes, esto ha obligado a emplear fertilizantes sintéticos para proveer aquellos elementos que el cultivo demanda cuando el suelo no es capaz de hacerlo.

La mayoría de los nutrientes requeridos cumplen con una función específica para el rendimiento de la plantación; por ejemplo, el nitrógeno es importante porque estimula el crecimiento y desarrollo, el fósforo ayuda en el desarrollo radicular y el crecimiento temprano de brotes, otros elementos como el magnesio, azufre y el hierro multiplican la actividad fotosintética para asegurar altos rendimientos, mientras que el calcio protege la producción de raíces, tallo y hojas (CONADESUCA, 2015).

Hernández et al., (2017) menciona que el manejo de la fertilización en el cultivo de caña de azúcar no es apropiado porque se generaliza la misma fuente y dosis en toda la superficie sin importar el ciclo, meta de rendimiento ni volumen de lluvia captado, por lo que es indispensable que se promueva un manejo de nutrientes acorde a cada caso, conciliando el requerimiento nutrimental de cada plantación cañera con el acopio y distribución de insumos en la región.

Los fertilizantes se clasifican en químicos y orgánicos, los primeros tienen en su composición tres sustancias principales: el nitrógeno, el fósforo y el potasio, y los orgánicos son producidos con materiales de origen vegetal o animal (Salgado et al., 2003).

Los plaguicidas son sustancias xenobióticas usadas en la producción de cosechas para el control de plagas, enfermedades y malezas. La aplicación de estas sustancias implica la emisión de residuos a los diferentes compartimientos ambientales (Hayo et al., 1998; Barba-Ho y Becerra, 2011). El impacto ambiental de la aplicación de los plaguicidas depende de las características de este, como su toxicidad sobre los organismos acuáticos, el ambiente receptor (tipo de suelo) y su aplicación, ya sea sobre el suelo o sobre el cultivo.

Ramírez-Mora et al., (2018), realizaron un estudio para identificar el uso histórico de los plaguicidas utilizados en el cultivo de caña de azúcar en los últimos 30 años en el distrito de riego La Antigua, Veracruz, teniendo como resultado que se ha utilizado carbofurán para el control de la mosca pinta, seguido del organofosforado Monocrotofos, apoyado de un segundo herbicida que puede ser el glifosato o algún otro que contenga la fórmula 2,4-D más ametrina.

El Diurón y el Glifosato son los plaguicidas que ofrecen más riesgo para el ambiente y la salud del ser humano, pues son los que presentan mayor toxicidad, menor biodegradabilidad y mayor persistencia en el ambiente (Barba-Ho y Becerra et al., 2011).

Los herbicidas forman parte de un grupo de plaguicidas de uso agrícola, las formulaciones más utilizadas para el control de malezas en los cultivos de caña de azúcar, arroz, maíz, café y banano son el Gesapax 500 SC, Gesaprin nueve-0 90 WG, Roundup SL, Karmex W, los ingredientes activos de estos productos son respectivamente Ametrina, Atrazina, Glifosato y Diurón (URPA, 2002 en Barba-Ho, Becerra. 2011). Ramírez-Mora et al., (2018) mencionan que desde el año 1980 al 2012 se utilizaron ingredientes activos de los organoclorados, organofosforados, carbamatos y piretroides para insecticidas, y atrazinas, organoarsenicales, fenoxiacético y bipyridilos para herbicidas.

La aplicación de herbicidas puede ser pre emergente, se realiza entre 10 y 12 días después de la siembra y antes de que el material de siembra germine. Este tipo de aplicación requiere buena humedad en el suelo y una aplicación a presión constante (Almeida, Vera. 2020; Álvarez, Steven. 2020), se considera pos-emergente cuando

la aplicación se realiza después de la germinación de la caña y antes que las malezas alcancen una altura superior a 10 cm. Se debe realizar cuando las malezas presentan una cobertura superior a 40% del área de cultivo (Gómez 2018; Álvarez, Steven. 2020)

Los herbicidas que llegan al suelo son fuertemente absorbidos, aun en suelos con bajos contenidos de arcillas y materia orgánica (Nivia 2018; Álvarez, Steven. 2020). Martínez (2019) menciona que en Quintana Roo debido a la falta de control de sustancias químicas han ocasionado daños en el ecosistema, pues todos los residuos se filtran hacia el subsuelo llegando a ríos y mares, además que la producción de miel se ha visto afectada a causa de las constantes fumigaciones generando el deceso masivo de colmenas provocando una disminución en la producción y calidad de exportación.

1.4. Ventajas y desventajas de la quema de caña de azúcar.

El fuego ha sido usado por el hombre de manera ancestral, en la agricultura tiene como objetivo la limpieza del terreno para su posterior cultivo o la quema de follaje seco, en la ganadería, se realiza la quema para que resurjan nuevos brotes de pasto, en el área forestal es usado con el objetivo de obtener carbón (Alvarado, 2007).

El fuego en la agricultura es utilizado como técnica para la eliminación de cobertura vegetal residual de una cosecha previa y como método de control de diferentes plagas. (Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural, 2021).

La quema controlada y el incendio forestal son dos cosas muy diferentes en todos los sentidos (Chaves y Bermúdez, 2006), la quema es la aplicación planeada y controlada del fuego, mientras que el incendio implica el uso de este de manera accidental o malintencionada (Alvarado, 2007).

Cabrera y Zuaznabar (2010) coinciden con Chávez y Bermúdez (2006) en que la quema es usada antes de la cosecha para la eliminación de la cobertura vegetal, el control de maleza y que la disminución del material seco facilita el corte de los tallos, debido a que entre menos materia vegetal este presente, menor será el esfuerzo por realizar del cortador, agiliza la cosecha y por lo tanto incrementa el rendimiento

de los trabajadores, mejora la calidad física de la materia prima, existe además una requema e incineración de residuos vegetales de la caña que quedaron sobre la superficie del suelo después de la zafra, esta última quema se realiza con el fin de eliminar residuos que perjudiquen el retoño y ahijamiento de la plantación (Rivera-Cruz et al., 2017).

El uso de la quema proporciona ciertos beneficios ambientales, entre los que se destacan, la reducción de herbicidas pre-emergentes debido a que con el uso del fuego se eliminan todas las malezas, se reduce el laboreo, mejora el suelo, debido a que minerales como manganeso (Mg), potasio (K) y sodio (Na) regresan al suelo en forma de sales enriqueciéndose el mismo y devolviendo los nutrientes extraídos durante la cosecha (Alvarado, 2007), pero desde otro punto de vista con esta actividad se favorece la erosión y se reduce la conservación de la humedad del suelo.

La quema controlada es considerada como una práctica peligrosa tanto para las personas que lo efectúan como para las comunidades próximas a los cañaverales, las afectaciones producidas pueden ir desde afectaciones a la biodiversidad y al ecosistema, estimulando el surgimiento de plagas (Chávez y Bermúdez, 2006), disminuir la fertilidad y aumentar la erosión del suelo, así como la generación de ceniza y humo que afecta a personas, animales y mantos acuáticos cercanos (Alvarado, 2007). Salgado et al. (2003) afirma que la aparición de nuevas plagas y enfermedades, la degradación de los suelos y la contaminación ambiental generada por la quema de la caña y los residuos industriales hacen actualmente del cultivo de caña de azúcar una actividad agrícola no sustentable.

Durán (1999) y Davalos (2007) señalan que en Colombia entre el 60 y 80 % de la caña es quemada antes de ser cortada a fin de eliminar el follaje y facilitar el proceso de corte, mientras que Madriñan (2002) y Davalos (2007) afirman que dicha quema genera aumentos en la productividad, pero libera en la atmósfera monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO), (NO₂), (NO_x), metano (CH₄) y partículas menores a 10 micras que afectan el funcionamiento del sistema respiratorio, cardiovascular, reproductivo y neurológico del hombre.

El fuego también puede causar importantes cambios en las propiedades físicas y químicas de suelos incluyendo la densidad de volumen y estructura, incrementar la cantidad de cationes del suelo, y disminuir el contenido de carbono (C) y nitrógeno (N) en la superficie de los suelos (Cáceres 2018).

Existen diversos estudios sobre el efecto que las temperaturas alcanzadas durante la quema han producido en el suelo. Dimitrakopoulos (1994) en Úbeda (2001) señalan los efectos en el suelo a diferentes temperaturas, a 50°C o 60°C es letal para el fotoplasma de las plantas, en el rango de 100°C a 200°C los efectos son la pérdida del 50% de nitrógeno, empieza a disminuir el valor de pH y ocurre la desaparición de algunos componentes de la materia orgánica, aumento de amonio, fósforo, calcio, magnesio y sodio, así como un descenso de la capacidad de absorber agua del suelo y su plasticidad. A los 300°C ocurre la desaparición por calcinación de la materia orgánica, a 315°C el pH del suelo se incrementa, superando los 315°C y hasta llegar a los 400°C el suelo pierde el 75% del nitrógeno. De los 400°C a 550°C ocurre el descenso del calcio, sodio, magnesio, desaparición de amonio, aumento progresivo de potasio y la desaparición total de los residuos orgánicos. Al llegar a los 700°C existe la destrucción total de la materia orgánica, pérdida de los OH⁻ de las arcillas, aumento de pH. Cuando el suelo presenta temperaturas de 700°C a 900°C los efectos en el suelo son la oxidación del suelo, cambios irreversibles en las arcillas, descomposición de los carbonatos, incremento de calcio, magnesio, descenso de potasio y aumento de la absorción de agua, pero no de la plasticidad. Además, los suelos que han estado sometidos a una temperatura elevada evidencian, casi siempre, cambios en sus propiedades físicas y químicas.

Los cambios físicos son atribuidos, en gran medida, a cambios químicos y mineralógicos producidos por el incremento de la temperatura y la pérdida de materia orgánica. Así pues, un cambio en la textura del suelo puede ser debido a la calcinación de hierro y aluminosilicatos a temperaturas suficientemente elevadas (Bemetrioux et al., 1960 en Úbeda. 2001).

Se debe de tener en cuenta que solo se considera la temperatura alcanzada, otro aspecto a considerar es que una misma intensidad de fuego afectará de manera diferente a los primeros centímetros del suelo, siendo los efectos diferentes a más profundidad. La temperatura alcanzada en un incendio sólo tiene consecuencias en los primeros cinco centímetros del suelo, pero se debe de tener en cuenta el tipo de suelo, tipo de vegetación, profundidad y la intensidad del fuego (Heyward, 1938; Úbeda, 2001).

Ladrach (2006) en un estudio de la quema de la caña registró temperaturas de entre 600°C y 750°C, mientras que la temperatura máxima a los dos centímetros de profundidad no subió a más de 34° C. En Venezuela, Arnal (1976) observó un aumento máximo de 6° C a los 2 cm de profundidad, pero solamente 20 minutos durante toda la quema. Rivera-Cruz et al., (2017) concluyen que el fuego no es siempre dañino para el suelo porque el calentamiento durante las quemas controladas es solo superficial.

1.5. Metales pesados.

El término “metal pesado” hace referencia a aquellos elementos químicos cuya densidad es mayor a 5 g/ml, estos son abundantes en la naturaleza, entre estos metales se encuentran el Al, Ca, Sr, Ba, La, Cu, Hg, Ag, Fe, Co, Ni, Zn, As, Cd, Pb y Cu (Calva y Torres, 2004; Nieboer y Richardson, 1980), algunos de ellos son esenciales para los organismos vivos, sin embargo, se convierten en tóxicos cuando se encuentran en concentraciones elevadas o se modifica su forma química.

Los metales pesados se encuentran generalmente como componentes naturales de la corteza terrestre, en forma de minerales, sales u otros compuestos. No pueden ser degradados o destruidos fácilmente de forma natural o biológica ya que no tienen funciones metabólicas específicas para los seres vivos (Abollino et al., 2002; Prieto et al., (2009) y Calva y Torres (2004) mencionan que el aumento en la concentración de los metales pesados en la biósfera puede ser resultado de fenómenos geológicos o derivado de las actividades antropogénicas, por ejemplo, el cromo (Cr) y cadmio (Cd) son utilizados en la industria de los fertilizantes, el plomo

(Pb) puede ser introducido a partir del uso de plaguicidas que contengan arsenato de plomo. El Cd es usado para la fabricación de baterías de níquel-cadmio (Wu et al 2016; Pabón et al. 2020). El silicio (Si), aluminio (Al), hierro (Fe), calcio (Ca), sodio (Na), potasio (K) y magnesio (Mg) pueden encontrarse en el suelo siendo parte de los minerales, mientras que manganeso (Mn) es imprescindible para el metabolismo vegetal (Mahler, 2003; Prieto et al., 2009).

Una vez incorporados al suelo los metales pesados pueden ser fijados por procesos de adsorción, complejación y precipitación, además, ser absorbidos por las plantas y con ello incorporarse a las cadenas tróficas, también pueden pasar a la atmósfera por volatilización o ser trasladados a las aguas subterráneas o superficiales (García y Dorronsoro, 2005), el pH, potencial redox, composición iónica de la solución del suelo, capacidad de intercambio, presencia de carbonatos, materia orgánica y la textura, son algunas de las características del suelo que puede influir en la movilización de los metales pesados en el suelo (Prieto et al., 2009).

Alrededor del mundo se han realizado diversas investigaciones para poder determinar las concentraciones de metales pesados en suelos o agua. Desde 1991, el gobierno de China ha monitoreado y evaluado los niveles de metales pesados en lugares contaminados (Chen et al., 1996; Prieto et al., 2009), el objetivo es identificar las propiedades del suelo y el efecto de los metales pesados sobre la calidad de agua, en la actividad de los microorganismos en los suelos, en la salud humana, así como en los rendimientos y la calidad de las cosechas.

En Colombia Vargas A. (2012), trabajó en una investigación con el fin de mostrar la influencia que tiene la aplicación de compost industrial procesado en un ingenio azucarero, sobre el comportamiento de las concentraciones totales de plomo, cadmio, cobre y zinc en un suelo Typic Haplustolls que se cultiva con caña de azúcar desde hace más de 10 años.

En Belice, Yah (2018), en su trabajo de tesis realizó una investigación con el propósito de aislar bacterias de suelos agrícolas expuestos a plaguicidas 2,4 D y poder estudiar la degradación de este, en este estudio también exhibe las características fisicoquímicas, los nutrientes esenciales para el cultivo de caña de

azúcar, y las concentraciones de micronutrientes y metales (Zn, Mn, Na, Mg, Fe, Cr, Pb y Ni) presentes en las muestras de suelo analizadas.

En Perú, se han realizado estudios sobre metales pesados en suelos de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao L.*) por Enrique et al. (2016), en donde se analizaron los resultados en función de la concentración de cada metal, así como observar las tendencias de variación de los valores en función de la profundidad.

En Tabasco, De la Cruz-Pons et al., (2012), cuantificaron el contenido total y extractable de los metales Pb, Ni, V, Cd, Fe, Zn, Cu y Mn en suelos, en la zona cañera del ingenio presidente Benito Juárez, el muestreo de suelos lo realizó en los grupos Vertisoles y Fluvisoles.

En cuanto al estado de Quintana Roo corresponde, Tun-Canto et al., (2017), realizó un estudio denominado Metales pesados en suelos y sedimentos de la zona cañera del Sur de Quintana Roo, México, a fin de determinar la presencia y distribución de Hg, Cd, Cu, y Fe, así como valores de pH, materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico de los suelos.

El hecho de que estos metales se encuentren en los diversos ecosistemas es de preocuparse, dado que muchos seres vivos dependen del adecuado equilibrio en su lugar de alimentación o de vivienda, el cómo llegan dichos metales a los distintos ecosistemas varía según el tipo de actividad que se desarrolla por el hombre (Mohán et al. 2006; Pabón et al. 2020).

2. Justificación del problema:

La quema controlada en los cultivos de caña de azúcar antes y después de la cosecha ha generado mucha controversia, los agricultores siempre han realizado esta práctica porque les facilita el trabajo y reduce sus costos de producción, mientras que, para las comunidades aledañas a estos cultivos esta acción representa un peligro constante en temporadas de la zafra debido a las altas temperaturas y la ceniza que se generan durante la quema, otro factor importante a tomar en cuenta es que el uso de diferentes herbicidas, plaguicidas y el mal manejo de fertilizantes durante las diferentes etapas fenológicas de la caña de azúcar genera una fuente importante de metales pesados y durante la quema podrían volatizarse a la atmosfera o infiltrarse al suelo.

Esta investigación se centra en analizar si las temperaturas alcanzadas durante la quema producen algún cambio en la distribución de la concentración total de metales pesados antes y después de la quema en los primeros veinte centímetros de profundidad del suelo.

3. Pregunta de investigación:

¿La distribución y concentración de los metales presentes en el suelo es afectada por las temperaturas alcanzadas durante la quema en la zona cañera?

4. Objetivo general:

Analizar la distribución y concentración total de (Fe, Al, Mn, Cu, Cr, Pb) antes y posterior a la quema controlada en un suelo Gleysol presente en la zona cañera de Quintana Roo.

5. Objetivos particulares:

Determinar la distribución de las concentraciones totales de (Fe, Al, Mn, Cu, Cr, Pb) en los primeros 20 cm de suelo antes y después de la quema.

Comparar las concentraciones de (Fe, Al, Mn, Cu, Cr, Pb) en diferentes estratos del suelo antes y después de la quema.

6. Área de estudio.



Figura 1. Área de estudio. Parcela "El Zapote", Othón P. Blanco, Quintana Roo. Elaboración propia.

El Ingenio San Rafael de Pucte (antes llamado Álvaro Obregón) se creó en la década de los 70's, con una inversión de 750 millones de pesos, con el objetivo de dar empleo a uno de cada 10 habitantes del territorio. En la zafra de 1979- 1980 produjo 19,000 toneladas de azúcar refinada, en el periodo de 1985-86 se tuvo una producción de 64,549 toneladas (Gómez, 1998). En el ciclo de 2010-2011 la producción fue de 23,079 toneladas de azúcar. (CONADESUCA, 2010). La zafra del 2021 terminó en julio de 2022, en donde se trabajaron 799,774 hectáreas, con una molienda de 54'680 toneladas de caña bruta para obtener una producción total de azúcar de 6'185,050 toneladas (CONADESUCA, 2021).

En la zona la topografía es plana con muy ligeras pendientes, se presentan algunas depresiones en las que se localizan humedales, que propician inundaciones en épocas de lluvias. En esta zona los suelos dominantes son de tipo Gleysol (se

inundan o tienen mal drenaje), aunque se encuentran también Phaeozems/Luvisols/Cambisols y Leptosols/Luvisols que son utilizados para pastizales y cultivos (Fragoso et al., 2016). Los vientos que inciden en el clima pueden clasificarse en vientos regulares, periódicos y huracanes. (Gómez, 1998). El clima es cálido subhúmedo con una temperatura media anual es de 26,7°C y una precipitación anual de 1307 mm, los grupos de suelo dominantes en el área son Gleysol, Vertisol, Luvisol y en menor escala Leptosol (INIFAP, 2012: Fragoso et al., 2016).

El estudio se realizó en el ejido Álvaro Obregón en un predio de 16 hectáreas denominado “El Zapote” con coordenadas 18°18’50” latitud norte y 89°42’11” longitud oeste, en un cultivo de caña de 10 años en producción, con una altura promedio de 3 m y sin plagas sobre un suelo Eutric Gleysol (Clayic, Vertic), el más representativo y abundante en el área, cuyas características son el alto contenido de arcillas, problemas hidromorfológicos, predominancia de reacciones de reducción lo que favorece las coloraciones grisáceas (WRB,2015).

7. Metodología:

Para lograr identificar los efectos de la quema, se realizaron dos muestreos en el intervalo de un ciclo reproductivo, el primero cuando el cultivo alcanzó su máximo desarrollo y el segundo después de la quema y cosecha de este.

Se siguieron las metodologías de muestreo y análisis de Siebe et al. (1996) y la Norma Oficial Mexicana (NOM-021-RECNAT-2000) (SEMARNAT, 2002) que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, la determinación de los metales totales presentes se realizó por espectrofotometría de absorción atómica.

Se realizaron dos tipos de muestreos:

1. Muestreo de suelo superficial, se utilizó el diseño por zig-zag, con 10 sitios de muestreo, en cada uno se eliminó la hojarasca y el horizonte orgánico; para que a partir del horizonte mineral se pueda tomar una muestra cada 2 cm hasta llegar a una profundidad de 20 cm teniendo así un total de 10 muestras por cada sitio de muestreo.
2. Muestreo del perfil del suelo con fines de clasificación, se realizó una calicata para exponer el perfil y los horizontes presentados, se tomó una muestra de 1 kg por horizonte para ser analizado en el laboratorio.

Para medir las temperaturas alcanzadas en el suelo durante la quema se utilizaron 10 placas de cerámica cruda (sin vidriado) de 10 por 5 cm con pintura termosensible con líneas de registro verticales de 5 cm de altura, con 0.5 cm de ancho y una separación de 0.5 cm por cada una de ellas, teniendo siete indicadores de temperaturas (90-130°C, 130- 150°C, 150-180°C, 180-220°C, 230-260°C, 320-340°C, 590-630°C). Para medir la temperatura superficial se utilizó un pirómetro laser portátil a 5 m de distancia.

En el laboratorio se realizó la preparación de la muestra, la determinación de pH, color, así como la textura del suelo.

Para obtener la concentración total de los diferentes metales a estudiar, primero se realizaron 5 ciclos de digestión acida completa en un horno de microondas (marca

CEM, modelo Mars 6) a 200°C por 20 minutos. El procedimiento que se usó en cada ciclo fue el siguiente. Se pesó 1 g de suelo por cada muestra y se colocó en los tubos de polietileno, se le adicionaron también 10 ml de HNO₃, procurando siempre usar la campana de extracción de gases. Se aseguró que cada uno de los tubos que componen el carrusel estuviera debidamente cerrado y no hubiera evaporación de ácido. Posteriormente el contenido de cada uno de los tubos fue aforado a 50 ml con agua destilada y a su vez etiquetado.

Se prepararon 3 estándares de alta (10 ppm), media (5 ppm) y baja (1 ppm) concentración con la finalidad de hacer cubrir el rango de concentraciones totales de Fe, Al, Mn, Cu, Pb y Cr. La validación de las curvas de calibración de los estándares se realizó en el espectrofotómetro de absorción atómica en donde también se determinó la concentración total de cada uno de los metales. La lectura de Fe, Mn, Cu, Pb se realizó por aspiración directa con flama de tipo Aire-Acetileno, para el Cr se usó el tipo de flama Acetileno-Óxido nitroso, por último, para el Aluminio el tipo de flama usado fue Óxido nitroso-Acetileno.

Los resultados obtenidos fueron sometidos a un análisis de comparación de medias pre y posquema por profundidad. Se realizó además el análisis de varianza con los valores obtenidos para identificar en que estratos existían diferencias significativas.

8 Resultados:

8.1. Temperatura:

Las temperaturas registradas durante la quema en la superficie del suelo estuvieron por encima de los 200°C, con valores máximos de 500°C. En el perfil del suelo las temperaturas registradas en los primeros 5 cm de profundidad produjeron cambios en las pinturas térmicas de 90-130°C, 130-150°C y 150-180°C.

Las temperaturas alcanzadas pueden determinar que el fuego tiene alguna influencia sobre las propiedades físicas y químicas del suelo.

8.2. Color:

El suelo antes de la quema de acuerdo con las tablas de Munsell tiene un color en seco 10YR 4/2 (café grisáceo muy oscuro) con variaciones de Value de 3,4 y 5 y en húmedo 10YR 3/1 (gris muy oscuro) con variaciones del Chroma entre 1,2 y 3. Después de la quema y cosecha solo se aprecia cambio por después de los 10 primeros cm en el Chroma a valores de uno y dos indicando un color más oscuro (café oscuro).

El oscurecimiento de color reportado en los primeros centímetros podría deberse a la quema de la materia orgánica y presencia de cenizas depositadas en la superficie.

8.3. Textura:

En la textura se encontraron cambios, en prequema se observa un incremento en el contenido de arcillas de 45 a 52% con la profundidad, los limos se mantienen constantes a lo largo del perfil y las arenas disminuyen de 41 a 32% en el mismo intervalo de profundidad. En la posquema se observa un aumento en el contenido de limos y disminuye el contenido de arcillas, las arenas se mantienen en la misma cantidad mientras que el porcentaje de arcillas es menor (34-42%), en cambio, en los limos se observa un mayor contenido (28-18%).

8.4. pH

El pH del suelo es ligeramente ácido, los valores menores están en la superficie y a mayor profundidad se acercan a la neutralidad en la prequema. En prequema los valores van de 6.1 a 6.4, en la posquema el valor mínimo fue de 6.1 y el máximo de 6.7, aumentando 0.2 el valor de la media.

8.5. Metales pesados:

Los elementos analizados en este estudio fueron Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Cobre (Cu), Plomo (Pb), Cromo (Cr) y Aluminio (Al), las concentraciones totales detectadas se encuentran representadas en el cuadro 1.

Cuadro 1. Concentraciones de MP antes y después de la quema

Profundidad (cm)	Elemento (mg/kg)											
	Fe		Mn		Cu		Pb		Cr		Al	
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
0-2	42738.2	40267.5	1527.5	1366.9	30.5	30.0	40.3	43.4	118.4	122.0	42571.3	43996.0
2-4	43464.5	37594.2	1795.0	1509.7	30.7	29.9	39.7	47.0	118.0	113.2	54658.7	53697.3
4-6	36558.3	38919.2	1316.6	1092.2	26.7	30.4	30.4	40.8	100.6	125.2	55925.0	60784.3
6-8	42133.5	39647.7	1297.3	1465.7	31.2	30.0	36.3	43.2	119.5	118.6	61578.0	54640.3
8-10	39202.0	38627.5	1293.6	1713.9	29.6	29.2	37.8	45.8	111.4	124.2	65332.0	64698.7
10-12	39866.0	40711.7	1104.1	1720.9	29.2	31.0	35.2	47.6	106.9	127.7	44143.0	55202.7
12-14	41559.8	40957.0	1395.2	2088.2	29.6	29.0	39.9	44.5	115.0	120.9	53575.7	54380.7
14-16	38575.5	43405.3	1294.9	1571.5	30.2	30.6	36.7	45.6	115.7	128.9	44015.3	59599.7
16-18	40117.7	41082.5	1390.0	1520.2	30.1	31.1	38.8	45.7	114.8	137.4	46224.3	81244.0
18-20	42054.5	44253.7	1586.2	2215.6	30.2	31.8	41.1	51.6	116.7	134.0	53793.3	51217.0
Media	40627.0	40546.6	1400.0	1626.5	29.8	30.3	37.6	45.5	113.7	125.2	52181.7	57946.1
Mínimo	36558.3	37594.2	1104.1	1092.2	26.7	29.0	30.4	40.8	100.6	113.2	42571.3	43996.0
Máximo	43464.5	44253.7	1795.0	2215.6	31.2	31.8	41.1	51.6	119.5	137.4	65332.0	81244.0
Desviación estándar	2142.6	2063.8	192.8	330.6	1.2	0.9	3.2	2.9	5.9	7.2	7782.2	9934.7

Si analizamos los datos de manera general e identificamos tendencias podremos observar que los valores más bajos registrados en prequema para Fe, Cu, Pb y Cr se encontraron entre los 4-6 cm, el nivel de aluminio se registró entre los 0-2 cm, por tanto, podemos decir que en prequema las concentraciones más bajas estuvieron sobre los 0-6 cm de profundidad, excepto por el Mn en donde la concentración más baja estuvo entre los 10-12 cm.

En la posquema los valores más bajos se encontraron dispersos entre los veinte centímetros de profundidad, los valores después de la quema se encontraron casi siempre en la misma profundidad o unos centímetros por encima de los registrados en prequema, ejemplo de ello es para el Fe, en prequema el valor más bajo se detectó entre los 4-6 cm, y en posquema se registró entre los 2-4 cm, así mismo ocurrió con el Mn y Cr, para Pb y Al los valores más bajos fueron registrados a la misma profundidad en la prequema como en posquema.

Para las concentraciones más altas en prequema fueron registradas a partir de los 0-10 cm para Fe, Mn, Cu, Cr, Al, en el caso del Pb, se detectó entre los 18-20 cm de profundidad.

En la posquema los valores más altos para todos los elementos se registraron a partir de los 16-20 cm. Teniendo como particularidad que todos los valores más altos se registraron varios centímetros por debajo de los obtenidos en prequema, como por ejemplo el manganeso, en prequema el valor más alto se registró entre los 2-4 cm y después de la quema se registró el valor más alto entre los 18-20 cm de profundidad.

8.5.1. Hierro.

Las concentraciones registradas en prequema para Fe se encuentran representadas en la figura 2 y muestran que entre los 4-6 centímetros del suelo encontramos el nivel más bajo teniendo 36,558 mg/kg y el nivel más alto fue de 42,738 mg/kg mismo que fue encontrado en los primeros dos centímetros de profundidad, teniendo una media antes de la quema de 40,627 mg/kg. En la posquema la concentración más elevada que se detectó fue de 44,253 mg/kg ubicado de los 18-20 cm de profundidad, mientras que el nivel más bajo de Fe después de la quema estuvo entre los 2-4 cm con un valor de 37,594 mg/kg, la media de las concentraciones en posquema fue de 40,546 mg/kg.

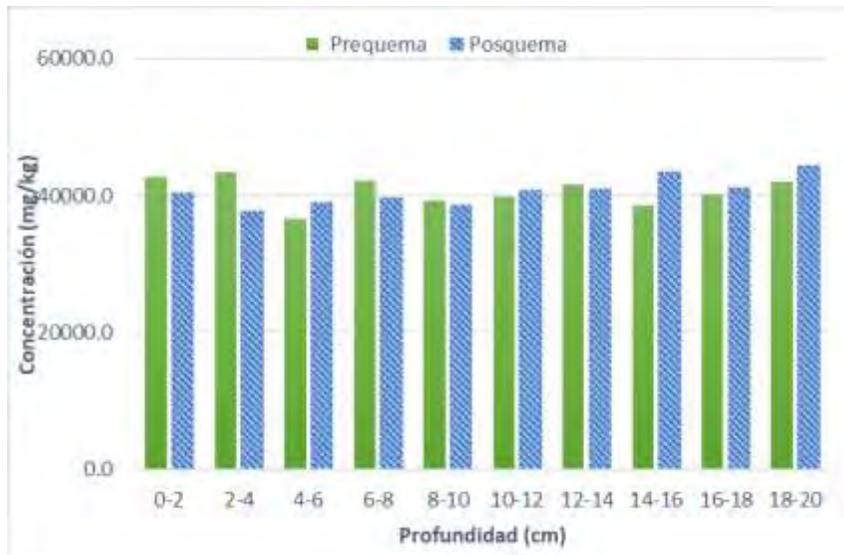


Figura 2. Gráfica de concentraciones de Fe pre y posquemada.

En la figura 3 se puede observar la distribución que tuvo el Fe en cuanto a profundidad, antes de la quemada en los cuatro primeros centímetros se registraron concentraciones a las obtenidas en la misma profundidad después de la quemada. El comportamiento de la línea punteada representa los valores en prequemada, las concentraciones varían a través de la profundidad, entre los 4-10 cm hay aumento y descenso de estas, a partir de los 14 y hasta los 20 centímetros los valores van en aumento.

En la posquemada las concentraciones que se registraron comienzan con valores altos después ocurre algo similar que en prequemada en donde aumentan y disminuyen los niveles de Fe para después de los 16 ir en aumento hasta llegar a los 20 centímetros.

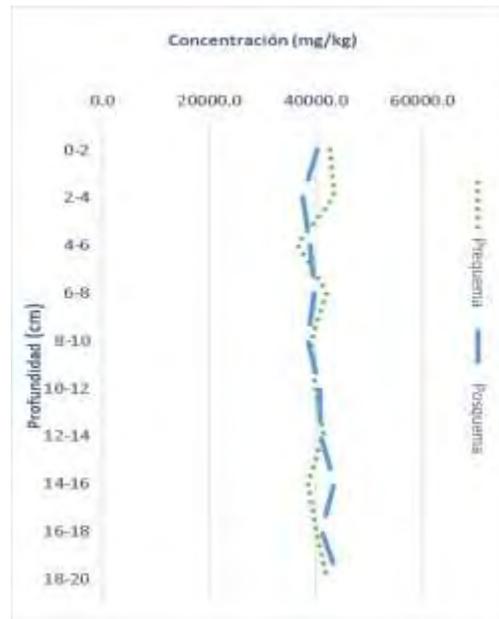


Figura 3. Gráfica de distribución de Fe de pre y posquemada

8.5.2. Manganeso.

Las concentraciones de manganeso a lo largo de los 20 cm se muestran en la Figura 4, se puede observar que después de la quema el valor más alto registrado fue de 2,215 mg/kg entre los 18-20 cm y el más bajo fue de 4-6 cm registrando un valor de 1,092 mg/kg. La media de las concentraciones en posquemada fue de 1,626 mg/kg. Antes de la quema los valores más bajo de Mn en las muestras de suelo estuvieron a partir de los 10 y hasta los 12 cm de profundidad con un valor de 1,104 mg/kg, mientras que el valor más alto se encontró de los 2-4 cm con una concentración de 1,794 mg/kg, la media de los datos obtenidos de Mn en prequemada fue de 1,400 mg/kg.

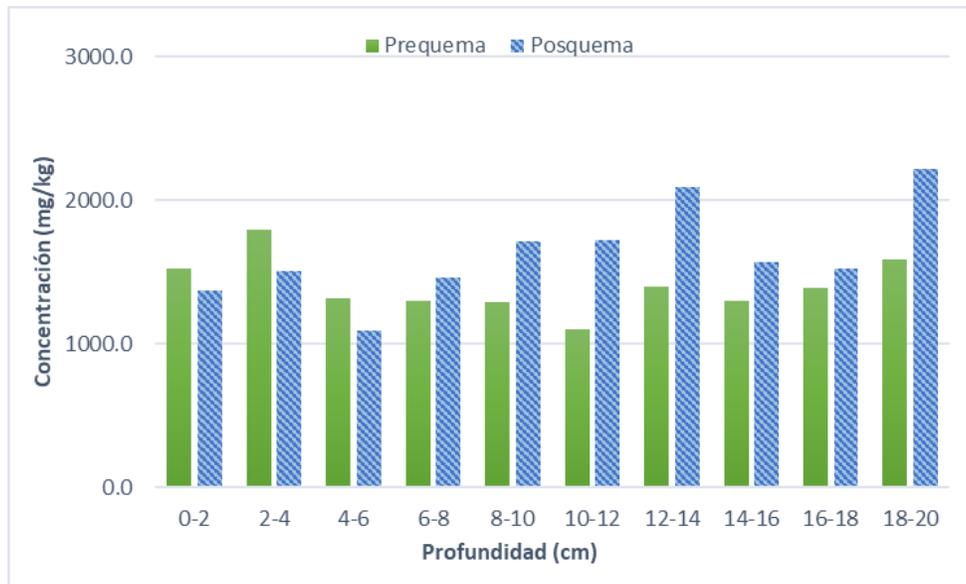


Figura 4. Gráfica de concentraciones de Mn en pre y posquemado

En la figura 5 se observa que en los primeros seis centímetros de profundidad los valores en prequemado son mayores a los obtenidos después de la quemado, sin embargo, a partir de los seis cm y hasta llegar a los 20 cm las concentraciones en posquemado son mayores a los de prequemado, es evidente que de los 18-20 cm de profundidad se encuentra la concentración más alta de Mn para todo el estudio. Si bien las concentraciones en posquemado son mayores, no se observan cambios grandes en cuanto a la distribución de estas.

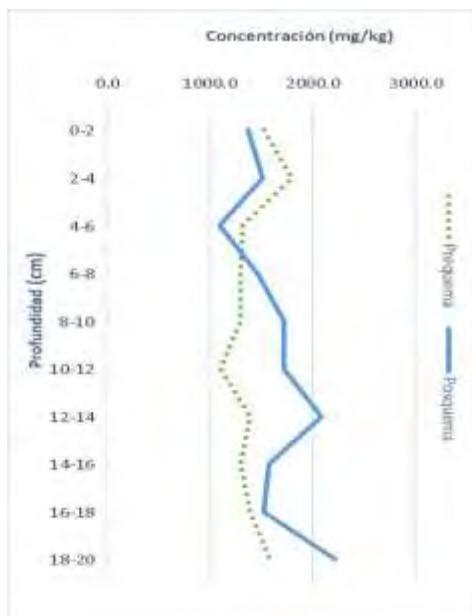


Figura 5. Gráfica de distribución de Mn en pre y posquemado

8.5.3. Cobre

En la figura 6 podemos observar las concentraciones obtenidas de Cu total antes y después de la quema, los valores más bajos en prequemado fueron de 26 mg/kg registrado a partir de los 4-6 cm de profundidad, mientras que la concentración más alta se detectó de los 6-8 cm teniendo un valor de 31mg/kg, la media de las concentraciones de Cu en prequemado fue de 29 mg/kg. En la posquemado las concentraciones obtenidas estuvieron en un rango de 29 a 32 mg/kg, registrando una media de 30 mg/kg.

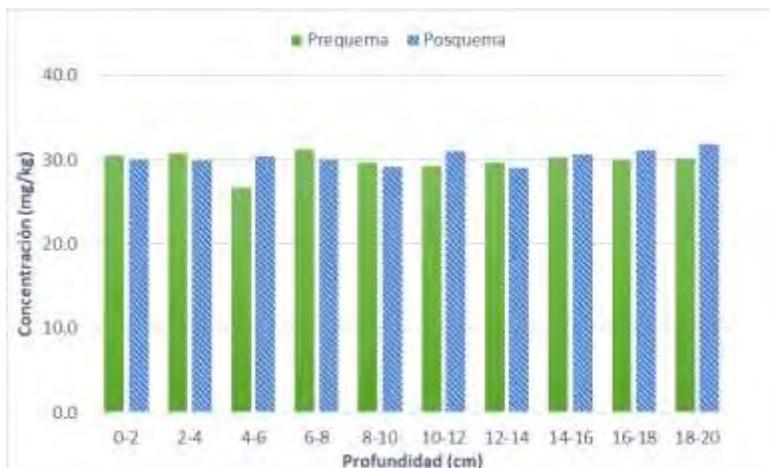


Figura 6. Gráfica de concentraciones de Cu en pre y posquemado

En la figura 7 se puede observar que las concentraciones de Cu en prequemada entre los 4-8 cm sufrieron ligeras fluctuaciones, fue entre esas profundidades en donde se ubicaron los niveles más bajos y altos de este elemento, teniendo valores de 26 y 31 mg/kg. Después de la quema los valores fueron muy parecidos a largo de los 20 cm de profundidad estudiados.

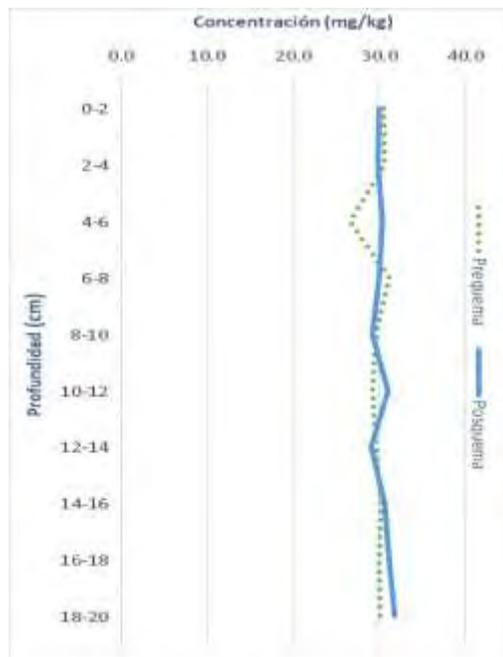


Figura 7. Gráfica de distribución de Cu en pre y posquemada

8.5.4. Plomo

Las concentraciones y distribución de plomo en los primeros 20 cm de suelo se pueden observar en la Figura 8.

Los valores de Pb en la prequema van desde 30.400 hasta los 41 mg/kg con una media de 37 mg/kg. Los valores más bajos se registraron entre 4-6 cm de profundidad, mientras que los más altos se detectaron en los últimos dos centímetros del estudio.

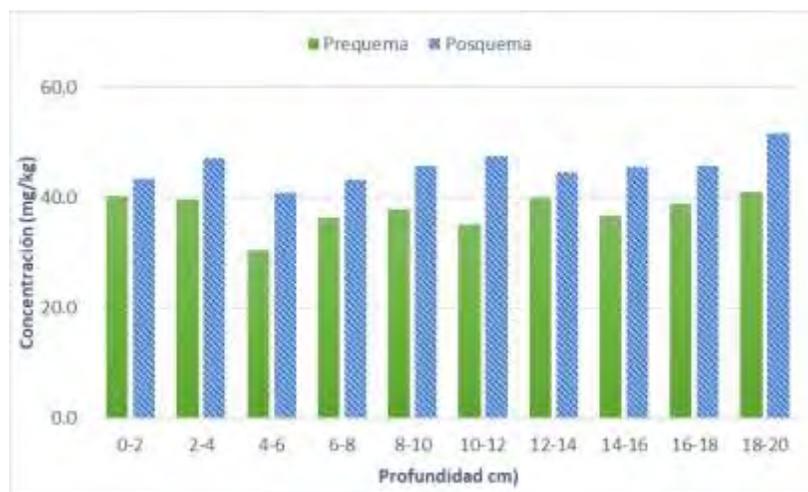


Figura 8. Gráfica de concentraciones de Pb en pre y posquema.

En la figura 9 se observa la distribución que tuvieron las concentraciones de plomo a través de los 20 cm de profundidad antes y después de la quema, se aprecia que en la prequema el valor más bajo se encontró de los 4-6 cm, estrato similar en el que se detectó el nivel más bajo en la posquema. El comportamiento la serie de datos en prequema fue casi siempre paralela a la de posquema, se puede observar que las concentraciones aumentaron después de la quema y que es de los 10-12 cm de profundidad en donde se observan las mayores diferencias entre los niveles de Pb en prequema y posquema.

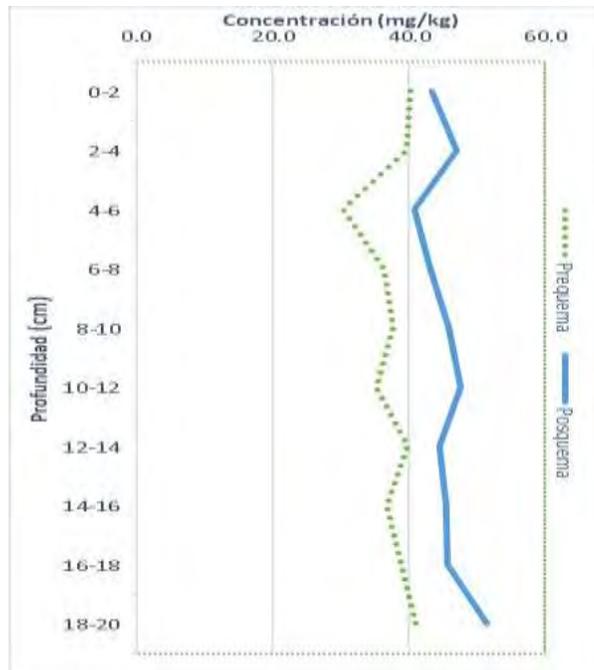


Figura 9. Gráfica de distribución de Pb en pre y posquema

8.5.5. Cromo

En los análisis realizados se obtuvieron concentraciones de cromo antes de la quema en un intervalo que variaba de 100 a 119 mg/kg con una media de 113 mg/kg. Después de la quema se detectaron concentraciones de Cr de entre 113 y 137 mg/kg, obteniendo una media de entre todas las concentraciones de prequema de 125 mg/kg, esto se puede observar en la figura 10.

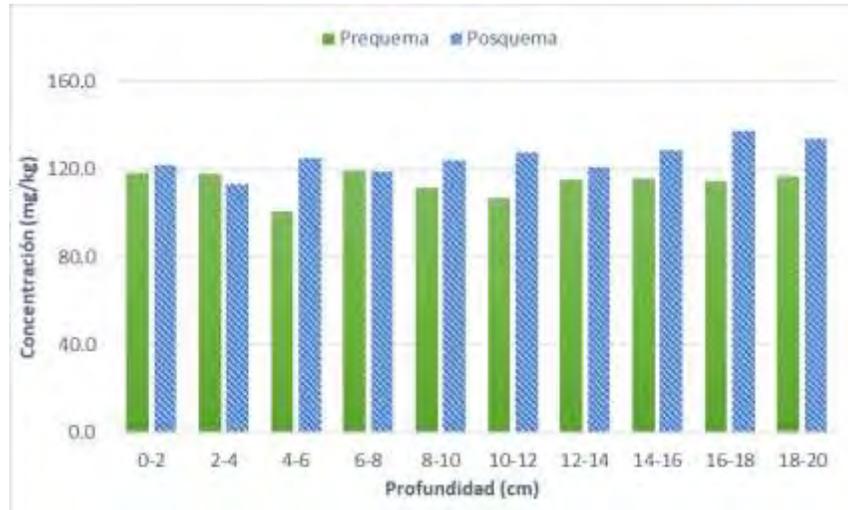


Figura 10. Gráfica de concentraciones de Cr en pre y posquema

De acuerdo con la figura 11, se puede observar el comportamiento del Cr a lo largo del perfil, en prequema cuando aumenta la concentración, en posquema disminuye, es hasta los ocho centímetros cuando el comportamiento se invierte, cuando en posquema aumenta en prequema disminuye, los valores mayores en la prequema se registraron de 6-8 cm mientras que en posquema se registraron de 16-18 cm de profundidad.

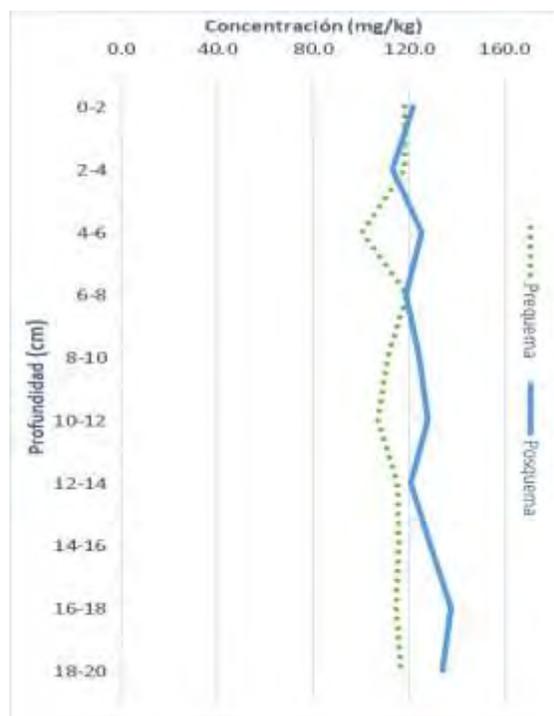


Figura 11. Gráfica de distribución de Cr en pre y posquema

8.5 Aluminio

Las diferencias de las concentraciones de aluminio antes y después de la quema se encuentran representadas en la figura 12, en la prequema se tuvo registro del nivel más bajo en los primeros dos cm de profundidad con un valor de 42,571 mg/kg mientras que el nivel más alto se encontró entre los 8-10 cm con 65,332 mg/kg, la media de las concentraciones antes de la quema fue de 52,181 mg/kg. En la posquema el nivel más bajo se encontró entre los 0 a 2 cm de profundidad con un valor de 43,996 mg/kg y la concentración más alta fue de 81,244 mg/kg entre los 16-18 cm, teniendo en total una media de las concentraciones después de la quema de 57,946 mg/kg de Aluminio.

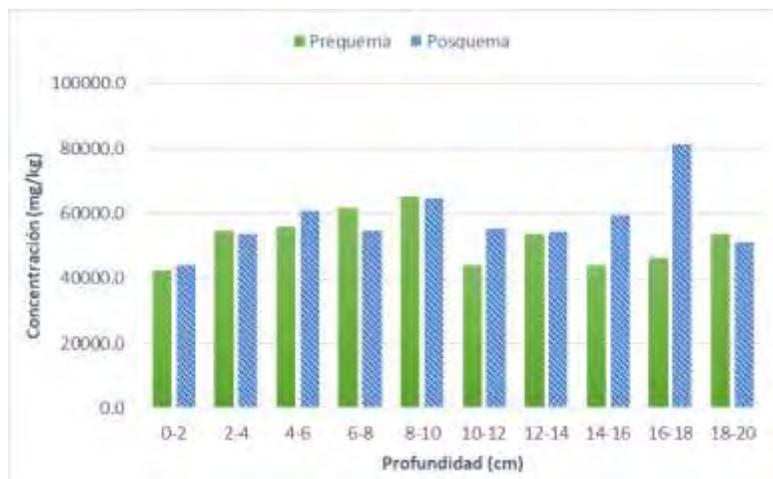


Figura 12. Gráfica de concentraciones de Al en pre y posquema

En la figura 13 se ven representadas las diferencias entre las concentraciones de aluminio antes y después de la quema. Se observa que a partir de los cuatro cm de profundidad es en donde las concentraciones disminuyen y aumentan al avanzar en profundidad hasta llegar a los 16-18 cm en donde se detectó el nivel más alto de Al para todo el estudio.

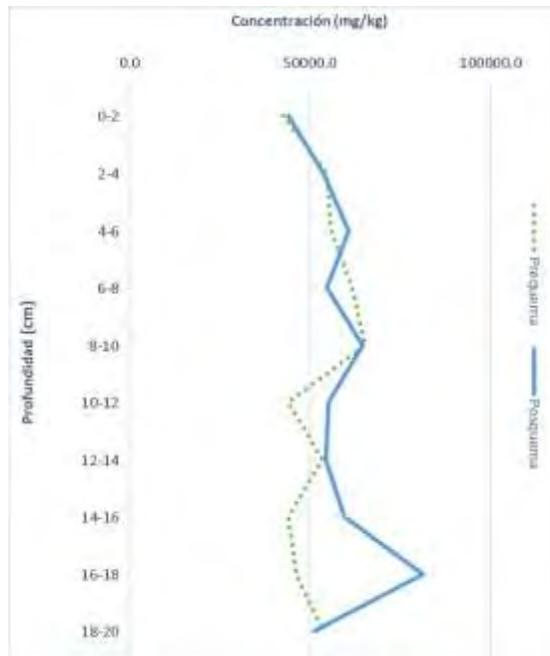


Figura 13. Gráfica de distribución de Al en pre y posquema

8.6 Comportamiento y distribución de Fe, Mn, Cu, Pb, Cr y Al antes y después de la quema.

Las concentraciones de pre y posquema de cada uno de los elementos estudiados se encuentran en la figura 14. En el caso del cobre no se observan diferencias significativas conforme se desciende en profundidad, los valores que se obtuvieron en posquema fueron similares o ligeramente superiores a los registrados en el muestreo anterior a la quema. Los resultados de plomo arrojaron que existe un aumento en las concentraciones de este elemento en todos los estratos y en donde se nota esa diferencia es entre los 4-6 y 18-20 cm de profundidad. Después de la quema los niveles de manganeso en los primeros 6 cm fueron inferiores a los registrados con anterioridad, pero a partir de los ocho cm las concentraciones siempre fueron superiores, teniendo diferencias que iban desde 600 a 700 mg/kg entre el estrato de prequema y el de posquema. El cromo mostró un comportamiento

similar al registrado con el plomo, las concentraciones de Cr en la posquema fueron inferiores a los obtenidos en prequema hasta los cuatro primeros centímetros, a partir de esa profundidad y hasta llegar a los 20 cm los niveles fueron superiores después de la quema. Se analizaron las concentraciones de Fe.

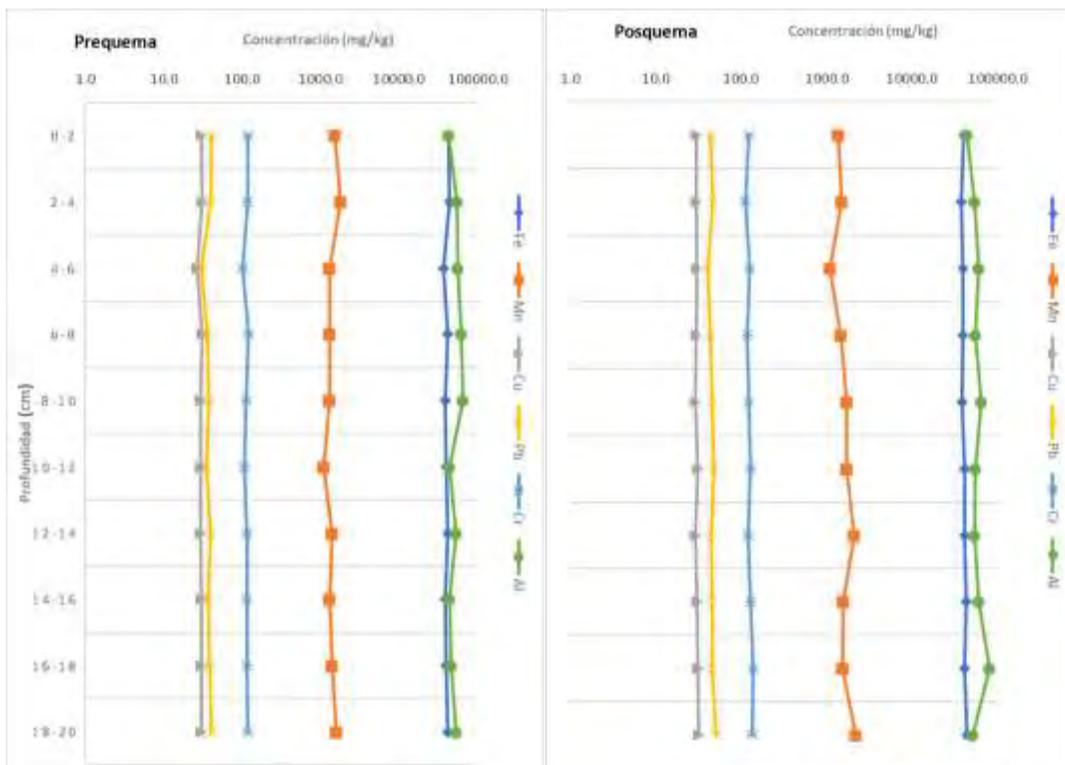


Figura 14. Gráficas de distribución de Fe, Mn, Cu, Pb, Cr y Al en pre y posquema

8.7 Análisis estadísticos

Inicialmente se calcularon los parámetros estadísticos básicos (promedio, mínimo, máximo, desviación estándar) así como un análisis de varianza.

El análisis de varianza (ANOVA) es una formula estadística que se utiliza para comparar las varianzas entre las medias de diferentes grupos, el resultado de este tipo de análisis es la estadística F' que nos muestra cual es la diferencia entre la varianza dentro del grupo y la varianza entre grupos, lo que nos genera es una cifra que nos permite conocer si la hipótesis nula se acepta o se rechaza.

Para este estudio se realizó un análisis de varianza de dos factores con una muestra por grupo con el objetivo de determinar cuáles concentraciones eran estadísticamente significativas, se realizaron 60 análisis en total, uno por cada estrato (0-2,2-4,4-6...18-20) en donde los datos a analizar fueron las medias de pre y posquemado de cada uno de los metales analizados. Los grados de libertad del denominador fueron de 2, mientras que los del numerador fue de 1, con un nivel de confianza del 95%.

En el cuadro 2 se observa cuáles fueron los valores de F para cada uno de los elementos, el valor crítico para F fue de 19, con color rojo se muestran los valores significativos, mientras que los resaltados con color azul no tienen significancia en el estudio. De acuerdo con el análisis (cuadro 2) solo existieron cambios significativos en los niveles de Manganeso de 0 a 2 cm y del Aluminio de 10 a 12 cm, en el caso de Fe, Cu, Pb y Cr aparentemente no se existen afectaciones por el fuego.

Cuadro 2. Análisis de varianza

Elemento		Fe	Mn	Cu	Pb	Cr	Al
p r o f u n d i d a d	0-2	1.20	49.36	0.50	6.10	2.31	0.16
	2-4	6.63	1.58	2.15	0.23	2.50	1.07
	4-6	0.26	1.99	0.27	0.17	0.54	0.11
	6-8	3.57	2.87	1.51	9.96	10.44	3.35
	8-10	0.01	0.82	0.03	0.75	0.06	6.17
	10-12	0.79	3.44	0.03	15.75	0.24	26.71
	12-14	0.41	0.03	0.05	1.37	1.35	2.07
	14-16	0.34	2.63	0.23	0.47	0.71	0.72
	16-18	1.88	2.02	0.59	0.37	1.23	1.05
18-20	1.18	0.52	0.74	6.65	0.24	0.83	

9 Discusión.

En esta investigación realizada en la zona cañera del sur del Estado de Quintana Roo, México, el valor mínimo de Cu total fue de 26 mg/kg, con valores máximos de 32 mg/kg. En Colombia, Torres-Mora et al., 2015 encontraron concentraciones de Cu total de 17.6 mg/kg. La Agencia de Protección Ambiental (2016), establece que el rango normal de Cu en suelos debe de ser de 5-30 mg/kg. Businelli et al., 2003 mencionan que en la corteza terrestre la media de Cu total es de 45-50 mg/kg, Tún-Canto et al., 2017 reportó valores que iban de 5.76 a 23.84 mg/kg en la misma zona donde se realizó nuestro estudio, este autor menciona que las concentraciones detectadas pueden provenir de fuentes antropogénicas y que la distribución de este metal, aunque es baja podría estarse viendo afectada por la actividad agrícola de la zona, por su parte García et al. 2015 menciona que los valores de fondo de Cu en un suelo Gleysol eútrico debe ser de 28.05 y 40.17 mg/kg los de referencia.

En este estudio la media de Pb en prequema fue de 37 mg/kg y en posquema de 45 mg/kg, en México existen fisuras en cuanto a la leyes o normas que regulen o eviten la contaminación en suelos, puesto que la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEARNAT-2001 menciona que las concentraciones de Pb en un suelo debe de encontrarse entre los 100 a 300 mg/kg mientras que la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 establece que un suelo agrícola puede representar un riesgo para las personas cuando las concentraciones totales de Pb sean mayores a 400 mg/kg, en Colombia se tiene registro de suelos con 16.7 mg/kg de plomo (Torres-Mora et al., 2005), y el límite permisible en ese país es de 100 mg/kg (Kabata-Pendias y Pendías, 2001), en Ecuador se han encontrado suelos con concentraciones de 19 mg/kg de Pb, se menciona que cuando se alcanzan los 60 mg/kg se procede a la remediación del suelo (Quinde, 2018), García et al. 2015, establece que los niveles de fondo de un suelo Gleysol eútrico será de 13.58 y 19.41 mg/kg los niveles de referencia.

En una zona cercana a nuestra área de estudio Yah, (2018) realizó un estudio en suelos agrícolas en San Víctor, Corozal, Belice, obteniendo 1.36 mg/kg de Pb. De acuerdo con la EPA (2016), el contenido normal de plomo en el suelo es de 10

mg/kg. Hernández et al., 2003 menciona que la disponibilidad del Pb en el suelo suele estar fuertemente ligada a el valor del pH en el suelo, debido a que conforme va disminuyendo el valor del pH la movilidad del Pb se va volviendo cada vez más alta. Los resultados obtenidos de Pb se encuentran dentro del rango que establecen las Normas oficiales mexicanas, el hecho de que los niveles estén dentro de un rango normal puede ser resultado de las especificaciones de la NORMA Oficial Mexicana NOM-004-SSA1-2013 que menciona que se deberá evitar el uso de compuestos de plomo como ingrediente o materia prima en la fabricación de plaguicidas.

Las concentraciones de Cr total de la zona cañera en prequema fueron de 113 mg/kg, mientras que en posquema fueron ligeramente mayores presentando 125 mg/kg, en Colombia Torres moral et al., (2005) registró 11.9 mg/kg de Pb en suelos, actualmente en México la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT-2004 establece que el nivel máximo de cromo es de 280 mg/kg, mientras que la EPA (1996) el rango normal de Cr en el suelo es de 0.1-0.5 mg/kg y se puede considerar toxico cuando se encuentren concentraciones entre 5 y 30 mg/kg (Torres-Mora et al., 2015), Belmonte et al., 2010 menciona que en Holanda la concentración máxima aceptable en suelos agrícolas son de 100 mg/kg, García et al. 2015, establece que los niveles de fondo de Cr para un suelo Gleysol eútrico son de 29.74 mg/kg y los de referencia son de 38.24 mg/kg. Las concentraciones obtenidas de Pb en este estudio se encuentran muy por encima de lo establecido por la EPA, sin embargo, para la normatividad mexicana se encuentran en un rango aceptable.

Las concentraciones reportadas de manganeso en prequema variaron de 1,104 a 1,794 mg/kg, mientras que en posquema los valores fueron de 1,092 a 2,215 mg/kg, existen otros estudios como el de Molero et al., 2008, que menciona que en suelos cultivados con plátano se han detectado concentraciones de 278 mg/kg. Estos valores corresponden a los reportados por Intagri (2018) que menciona que generalmente el contenido total de Mn en el suelo oscila entre 20 a 3000 mg/kg, aunque en promedio son 600 mg/kg, mientras que Galvao y Corey (1987), establecen que el manganeso se encuentra en el suelo de 500 hasta 900 mg/kg y

que de existir variaciones estas dependen de la localización geográfica, las actividades presentes y fuentes de contaminación, García et al. 2015 establece que 816.6 mg/kg deberán ser los niveles de fondo para Mn en suelos Gleysol eútrico, mientras que los niveles de referencia tendrán valores de 1166 mg/kg.

Las concentraciones reportadas de Al en este estudio tienen una media de 52181 mg/kg en prequema y 57946 mg/kg en posquema, estos valores están por encima de los que García et al. 2015 establece para un suelo Gleysol eútrico en donde los valores de referencia deberían ser de 46759 y 33284 mg/kg los de fondo. Sancha et al., (2005), menciona que los suelos con altas cantidades de aluminio pueden ser encontrados en lugares donde se ha utilizado nitrógeno en los cultivos, posiblemente las concentraciones registradas en la zona de estudio sea producto de la aplicación de fertilizantes en alguna etapa del cultivo de caña. Pudiera haber afectaciones por toxicidad si el pH de la zona fuera menor a 5.5 (Narvárez, 2010), el pH en prequema fue de 6.1-6.4, mientras que en posquema los valores fueron de 6.1-6.7.

Las concentraciones de Fe de esta investigación son ligeramente menores a los reportados por Tun-Canto et al. (2017) quien registro concentraciones en un suelo Gleysol que van de 8,786 a 51,712 mg/kg, pero se encuentran dentro del rango que establece García et al. (2015) que debe ser de 36144-46477 mg/kg en un suelo Gleysol eútrico.

En el presente estudio solo resultaron significativos los resultados obtenidos de 0-2 para el Mn, se debe recalcar que el manganeso total en el suelo está formado por el manganeso mineral, el Mn complejado orgánicamente, el Mn intercambiable y el Mn en solución, el equilibrio entre todos estos va a determinar la disponibilidad del manganeso en el suelo para las plantas (Gómez y Sotes, 2014) estos autores mencionan que el contenido total del manganeso puede variar según las propiedades del suelo y su comportamiento en el suelo es muy complejo y que uno de los procesos que afectan la disponibilidad y movilidad del Mn es la condición redox. En el caso del Al, solo resultados significativos los resultados obtenidos de 10-12 cm, también en ese estrato es donde se muestra un cambio drástico en las

concentraciones, a partir de los 12 cm de profundidad comienza a existir un aumento en los niveles de Al en posquema, posiblemente este comportamiento sea resultado de las temperaturas alcanzadas durante la quema que favorecen su distribución a lo largo del perfil.

El comportamiento que presentan las concentraciones de Cr, Cu, Pb puede estar ligada a la presencia de óxidos e hidróxidos de Fe y Mn, Rieuwerts et al. (2006) menciona que los suelos con altos contenidos de Fe y Mn se tiene una gran capacidad para absorber metales pesados, además existen otros factores que también pueden influir en su distribución y solubilidad, como pueden ser el pH ácido (Piotrowska y Kabata-Pendias, 1997), contenido y tipo de arcillas (Mc Gowen, 2004), García y Dorronsoro (2001) mencionan que la textura influye en la acumulación de MP, debido a que los suelos arcillosos suelen absorber en mayor cantidad metales pesados a diferencia de los arenosos que carecen de capacidad de fijación, la condición redox afecta la especiación y solubilidad del Mn en el suelo porque en suelos compactados e inundados como los gleysoles se ven favorecidas las condiciones de reducción, incrementando la disponibilidad de Mn, Cd, Cr y Zn (Kabata-Pendias, 2004).

García y Alonso, 2001; García y Dorronsoro 2001; Ferreras et al., 2006 mencionan que la concentración de los metales en el suelo se puede deber a procesos como la volatilización a la atmosfera o lixiviación a cuerpos de agua, o ser resultado de retención en el suelo o fijados por adsorción, complejación y precipitación.

10 Conclusiones:

En este estudio se observó que la quema controlada en la cosecha de caña de azúcar a pesar de ocasionar efectos negativos al ambiente, libera nutrientes como el Mn y Fe al suelo, mismos que suelen incorporarse a través de los primeros 20 cm de profundidad.

Durante la quema se alcanzaron temperaturas menores a 200°C que tuvieron efecto en la distribución del manganeso y aluminio a través del perfil del suelo, el resto de los elementos no tuvo mayores incidencias.

El calor de la quema afectó principalmente la concentración de metales pesados en los 2-4 cm de profundidad, también se observó que al aumentar la profundidad el calor no afecta el comportamiento de la distribución y concentración de los metales pesados.

Las concentraciones reportadas para Cu, Pb, Mn y Fe en este estudio se encuentran dentro de rangos considerados como normales respecto a los reportados en otros estudios, mientras que en el caso de Cr y Al se encuentran ligeramente por encima de las medias reportadas en trabajos similares, el hecho de que algunas concentraciones se encuentren de manera normal y otras no posiblemente se deba a fertilizantes o plaguicidas usados en alguna etapa del cultivo pero quizás sin conocer la dosis exacta de aplicación o sin conocer realmente las requerimientos de la variedad.

11 Bibliografía.

- Abollino, O., Aceto, M., Malandrino, M., Mentaste, E., Sarzanini, C. and Barberis, R. 2002. Distribution and Mobility of Metals in Contaminated Sites. Chemometric Investigation of Pollutant Profiles. *Environmental Pollution*, 119: 177.
- Almeida, RE. (2020). Estudio de herbicidas en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la zona de Pueblo Nuevo, cantón Babahoyo.
- Alvarado, N. M. (2007). Las quemadas en la agricultura (caña de azúcar), su regulación desde el punto de vista agrario y ambiental.
- Arévalo-Gardini, Enrique, Obando-Cerpa, Meyier E., Zúñiga-Cernades, Luis B., Arévalo-Hernández, Cesar O., Baligar, Virupax, & He, Zhenli. (2016). Metales pesados en suelos de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en tres regiones del Perú. *Ecología Aplicada*, 15(2), 81-89. <https://dx.doi.org/10.21704/rea.v15i2.747>
- Arnal, J. (1976). Problemática de la quema de la caña de azúcar. Venezuela. Seminario. Internacional Sobre Mecanización de la Cosecha de la Caña de Azúcar. Maracay, 26.
- Barba-Ho, L. E., & Becerra, D. (2011). Biodegradabilidad y toxicidad de herbicidas utilizados en el cultivo de caña de azúcar. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, (10), 11-19.
- Basta, N. T. & McGowen, S. L. (2004) Evaluation of chemical immobilization treatments for reducing heavy metal transport in a smelter-contaminated soil. *Environmental Pollution*, 127, 73-82.
- Bautista, F. (2021). Clasificación de suelos de la península de Yucatán. En: Los territorios kársticos de la península de Yucatán: caracterización, manejo y riesgos. Bautista F (Coord.) Asociación Mexicana de Estudios sobre el Karst. Ciudad de México. pp, 25-38.
- Bautista F. (1999). Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados. Publicación de la Universidad Autónoma de Yucatán. Yucatán, México.
- Bematrieux, R., Le Borgne, E., y Monnier, G. (1996): Evolution de certains propriétés du sol sous l'influence du chauffage. *C. R. Acad. Sci, París*, 251, 2753-2755
- Businelli, D., Massaccesi, L., Said-Pullicino, D. & Gigliotti, G. (2009) Longterm distribution, mobility, and plant availability of compost-derived heavy metals in a landfill covering soil. *Science of The Total Environment*, 407, 1426-1435.
- Cala, V. & Kunimine, Y. (2003) Distribución de plomo en suelos contaminados en el entorno de una planta de reciclaje de baterías ácidas. *Rev. Int. Contam. Ambient*, 19, 109-115.

- Cabrera, J. A & Zuaznabar, R (2010). Impacto sobre el ambiente del monocultivo de la caña de azúcar con el uso de la quema para la cosecha y la fertilización nitrogenada. I. Balance del carbono. *Cultivos tropicales*, 31(1), 5-13.
- Chaves, M., Bermúdez, A. 2006. *Motivos y Razones para Quemar las Plantaciones de Caña de Azúcar en Costa Rica. Políticas para la Agroindustria Azucarera Costarricense*. Heredia, Costa Rica, 2006. Memoria 2006. Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), agosto. Tomo I, 248- 253.
- Chen, Z.S., D.Y. Lee, C.F. Lin, S.L. Lo, and W. Y.P. 1996. Contamination of rural and urban soils in Taiwan, Boston, London.
- CONADESUCA (Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de azúcar). (2010). Reporte de avance de producción de caña y azúcar. CONADESUCA
- CONADESUCA (Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar). (2015). Ficha técnica del cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación- CONADESUCA.
- CONADESUCA (Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar). (2015). Nutrición del cultivo de caña de azúcar y uso eficiente de fertilizantes. Boletín técnico informativo octubre 2015.
- CONADESUCA (Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar). (2022). Reporte final de producción de caña y azúcar de la zafra 2021/22. Gobierno de México.
- Corey O, G., & Galvao, L. A. (1987). Manganese. Serie Vigilancia; 6.
- Crespo Álvarez, S. I. (2020). Problemas causados por el mal uso de los herbicidas en el manejo del cultivo Caña de Azúcar (*Saccharum officinarum*) en la zona Lorenzo de Garaicoa, Guayas (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2020).
- Cuenca, C. E. N. (2010) FITOTOXICIDAD DE ALUMINIO.
- Dávalos, E. 2007. La caña de azúcar: ¿una amarga externalidad? *Desarrollo y Sociedad* 59, 117-164.
- De la Cruz-Pons, A., Zavala-Cruz, J., Guerrero-Peña, A., Salgado-García, S., Lagunes-Espinoza, L. C., & Gavi-Reyes, F. (2012). Metales pesados en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa Tabasco. *Universidad y ciencia*, 28(2), 119-130.
- Dimitrakopoulos, A. P., Martin, R. E. Y papamichos, N. T. (1994): En: Sala, M y Rubio, J. L. Eds. Soil erosion as a consequence of forest fires. Geoderma Ediciones, Logroño, 199-206.

- Durán, E. (1999). "Estudio de caso sobre el manejo convencional y agroecológico del cultivo de la caña de azúcar en el Valle del Cauca, Reserva Natural El Hático".
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (9 de febrero de 2015) 5 razones por las que el suelo es clave para el futuro sostenible del planeta. Objetivos de desarrollo sostenible. Recuperado el 13 de noviembre de 2022, de <https://www.fao.org/sustainable-development-goals/news/detail-news/es/c/277124/>
- FIRA (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura). (2010). Producción Sostenible de Caña de Azúcar en México en Boletín Informativo, Nueva Época, Núm. 11, Año 2010.
- Ferreras, L., Gomez, E., Toresani, S., Firpo, I. & Rotondo, R. (2006) Effect of organic amendments on some physical, chemical, and biological properties in a horticultural soil. *Bioresource Technology*, 97, 635-640.
- García, F., Brios, A. D., & Guillermo, Z. V. (2015). Informe de determinación de niveles de fondo y niveles de referencia en tres asociaciones de suelo del departamento de Loreto, ejecutado durante el año 2015.
- García, A. & Alonso, J. (2001) Contenido de Metales Pesados en Suelos Forestales de Navarra. *Gorosti*, 1, 18-24.
- García, I. & Dorronsoro, C. (2001) Contaminación por metales pesados. Departamento de edafología y química agrícola de España, 1-16, Disponible en: <http://edafologia.ugr.es/conta/tema00/progr.htm>.
- García, I. y Dorronsoro, C. (2005). Contaminación por metales pesados. Tecnología de suelos. Universidad de Granada. Departamento de Edafología y Química Agrícola.
- Gómez, J. A. (1998). Historia y geografía de Quintana Roo. Colegio de Bachilleres del Estado de Quintana Roo. México, 152.
- Gómez J.F. (2018). Control de malezas. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia, Cali, CENICAÑA. P. 143-152.
- Gómez-Miguel, V. D., & Ruiz, V. S. (2014). El Manganeso y la Viticultura: una revisión. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Centro de Publicaciones.
- Hayo, M.G.; Vander, W; Zimmer, C. (1998). An indicator of pesticide environmental impact based on a fuzzy expert system. *Chemosphere*. 36(10):2225-2249.
- Hernández, F., Valencia, A., Toledo, J., Hernández, H. (2013). El sector cañero en Nayarit desde una perspectiva organizacional y ambiental. (Nayarit, México). Universidad Autónoma de Nayarit.

- Hernández, L., Probst, A., Probst, J. L. & Ulrich, E. (2003) Heavy metal distribution in some French forest soils: evidence for atmospheric contamination. *The Science of The Total Environment*, 312, 195-219.
- Hernández-Mendoza, T. M., & Galvis-Spinola, A. (2017). Productividad de la caña de azúcar por régimen hídrico y uso de fertilizantes en suelos someros. *Interciencia*, 42(4), 218-223.
- Heyward, F (1938): Soil temperatures during forest fires in the longleaf pine forest. *J. For*, 36, 478-491.
- Ibarra R.J, Cruz M.M, Serrano G.A, Hernández P.G, Cruz S.R (2015) Influencia de variables climáticas en los rendimientos agrícolas de la caña de azúcar en la empresa azucarera de Holguín. *Granma Ciencia* 19: 1-9
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). Continuo Nacional del Conjunto de Datos Vectorial Edafológico Escala 1:250 000, serie II.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2004), Guías para la interpretación de cartografía: edafología, 2-3.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2014), Guía para la interpretación de cartografía: edafología: escala 1:250 000: serie III.
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas y Pecuarias). (2012). Características climáticas y edáficas de las zonas de abastecimiento de ingenios cañeros en México. Gobierno Federal, SAGARPA, INIFAP.
- INTAGRI (Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura). (2017). Clasificación del suelo: WRB Y Soil Taxonomy. Serie Suelos. Núm. 28. Artículos Técnicos de INTAGRI, México. 5 p.
- INTAGRI (Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura). (2018). El Manganeso en la Nutrición Vegetal. Serie Nutrición Vegetal. Núm. 113. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 5 p.
- Kabata-Pendias, A. (2004) Soil-plant transfer of trace elements--an environmental issue. *Geoderma*, 122, 143-149.
- Kabata-Pendias A, Pendias H, (2001). Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Ladrach, C. (2009). El efecto del fuego en los ecosistemas agrícolas y forestales. Sociedad Internacional de Forestales Tropicales. USA.

- Madriñán, C. (2002). "Compilación y análisis sobre la contaminación del aire producida por la quema y la requema de la caña de azúcar", Tesis de Especialización en Agroecología, Universidad Nacional, Palmira.
- Mahecha-Pulido, J. D., Trujillo-González, J. M., & Torres-Mora, M. A. (2015). Contenido de metales pesados en suelos agrícolas de la región del Ariari, Departamento del Meta. *Orinoquia*, 19 (1), 118-122.
- Mahler, R.L. (2003). General overview of nutrition for field and container crops. In: Riley, L. E.; Dumroese, R. K.; Landis, T. D. Tech Coords. National Proceeding: Forest and Conservation Nursery Associations. 2003 June 9-12; Coeur d'Alene, ID; and 2003 July 14-17; Springfield, IL. Proc. RMRS-P-33.
- Martin E.C, Stephens W, Wiedenfeld R, Bittensbender H.C, Beasley J.P, Moore J.M, Neibling H, Gallian J.J. (2007). Sugar, oil, and fiber. En Loscano RJ, Sojka RE (Eds.) *Irrigation of Agricultural Crops*. 2a ed. ASA, CSSA, SSSA. Madison, WI, EE. UU. pp. 279-335.
- Martínez, H. J. L. (2019). Agroquímicos en Quintana Roo: Impacto en la Alimentación, Salud y Medio Ambiente. *Estudios Interculturales*, 2(9), 22-22.
- MEDMIN (Medio Ambiente Minería e Industria). (2006). *Caracterización Geológico-Minera Ambiental y Socioeconómico: Diagnostico Minero Ambiental*. Estudio Minero Municipio Poopó. La Paz, Bolivia.
- Méndez, J. P., Ramírez, C. A. G., Gutiérrez, A. D. R., & García, F. P. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and subtropical Agroecosystems*, 10(1), 29-44.
- Micó, C. (2005) Tesis Doctoral: Estudio de metales pesados en suelos agrícolas con cultivos hortícolas de la provincia de Alicante. Universitat de Valencia, Servei de publicacions, 508.
- Molero, M., Gutiérrez, L., Contreras, Q., Rondón, C., Carrero, P., & Rojas, E. (2008). Determinación de los niveles de: K, P, N, Ca, Mg, Zn, Cu, Fe, y Mn en muestras de suelos y tejido foliar del cultivo Musa AAB, subgrupo plátano cv. Hartón. *Producción Agropecuaria*, 1(1), 3-6.
- Nieboer, E. y D.H.S. Richardson. (1980). The replacement of the nondescript term heavy metals by a biologically and chemically significant classification of metal ions. *Environmental Pollution (Ser. B)*.1: 3-26
- Nivia, E. (2000). Efectos sobre la salud y el ambiente de herbicidas que contienen glifosato. Recuperado de [http://www.glifocidio.org/docs/impactos% 20generales/ig1.pdf](http://www.glifocidio.org/docs/impactos%20generales/ig1.pdf)

- Ortiz, I., Sanz, J., Dorado, M. & Villar, S. (2007) Técnicas de Recuperación de Suelos Contaminados. IN RÍUS, J. D. L. S. (Ed.) 1 ed. Madrid, Círculo de innovación en tecnologías medioambientales y energía.
- Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., & Gallo, J. A. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9-18.
- Piotrowska, M. & Kabata-Pendias, A. (1997) Impact of soils amended with Zn and Pb smelter dust on Cd concentrations in potatoes. *Journal of Geochemical Exploration*, 58, 319-322.
- Quinde, L. G. (2018). Determinación del grado de contaminación por presencia de metales pesados en suelos, raíces, hojas y frutas en plantas de banano debido al uso de agroquímicos en una finca ubicada en la Provincia de Los Ríos. Trabajo final para la obtención del título: MAGÍSTER EN CIENCIAS AMBIENTALES.
- Ramírez-Mora, E., Pérez-Vázquez, A., Landeros-Sánchez, C., Martínez-Dávila, J. P., Villanueva-Jiménez, J. A., & Lagunes-Espinoza, L. D. C. (2018). Uso histórico de plaguicidas en caña de azúcar del DR035 La Antigua, Veracruz. *Acta universitaria*, 28(4), 42-49.
- Rieuwerts, J. S., Ashmore, M. R., Farago, M. E. & Thornton, I. (2006) The influence of soil characteristics on the extractability of Cd, Pb and Zn in upland and moorland soils. *Science of The Total Environment*, 366, 864-875.
- Rivera-Cruz, MC, Magaña-Aquino, M, Trujillo (2017) MODIFICACIONES EN MATERIA ORGÁNICA Y ACTIVIDAD ENZIMÁTICA DEL SUELO POR FUEGO USADO EN LA QUEMA DE CAÑA DE AZÚCAR. *Seguridad Alimentaria: Aportaciones Científicas y Agrotecnológicas*, 1, 393-397.
- SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). (13 de julio de 2022). El fuego ya no es una alternativa. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-fuego-ya-no-es-una-alternativa>
- SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). (20 de agosto de 2019). Etapas del cultivo de caña. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/etapas-del-cultivo-de-cana>.
- SAGARPA ((Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). (2007). *Caña de azúcar mexicana*, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (SAGARPA). 16 p
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). (2018). *Inicia temporada de zafra en Puebla*. Representación de agricultura Puebla – SAGARPA.

- Salgado, G. S., Bucio, A. L., Riestra, D. D., & Lagunes, E. D. C. (2003). Caña de azúcar: hacia un manejo sustentable. Villahermosa, Tabasco, Campus Tabasco, Colegio de Postgraduados-Instituto para el Desarrollo de Sistemas de Producción del Trópico Húmedo de Tabasco.
- Salgado, G. S., Lagunes, E. L. C., Riestra, D. D., & Núñez, E. R. (2003). La caña de azúcar es un cultivo sustentable. *Tecnociencia Universitaria*, 2(6), 6-21.
- Sancha, A. C., Espinoza, C., & Mena, M. (2005). criterios de calidad de suelos y de aguas o efluentes tratados para uso en riego. Santiago: División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente.
- Secretaría de Salud. (2014). NORMA Oficial Mexicana NOM-004-SSA1-2013, Salud ambiental. Limitaciones y especificaciones sanitarias para el uso de los compuestos de plomo. Diario Oficial de la Federación. México
- SEMARNAT (Secretaría de medio Ambiente y recursos Naturales). (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. 31 de diciembre de 2002.
- SEMARNAT ((Secretaría de medio Ambiente y recursos Naturales). (2007). Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Diario Oficial de la Federación.
- SEMARNAT (Secretaría de medio Ambiente y recursos Naturales). (5 de diciembre de 2015), ¿Sabes cuál es la importancia de los suelos? (en línea), disponible en <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/sabes-cual-es-la-importancia-de-los-suelos>.
- Serrato, F. B., Díaz, A. R., Sarría, F. A., Brotóns, J. M., & López, S. R. (2010). Afección de suelos agrícolas por metales pesados en áreas limítrofes a explotaciones mineras del sureste de España. *Papeles de geografía*, (51-52), 45-54.
- Servón, P. F., Bautista, F., Pereira, A., & Frausto, O. (2016). Distribución de Suelos en ambientes tectokársticos en la porción este de la Península de Yucatán, México. *GEOS*, 36(2).
- Siebe, C., Jahn, R. y Stahr, K. (1996). Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Publicación especial 4. Sociedad Mexicana de la Ciencia del suelo, A.C. Chapingo, México.
- Torres, A. M. R y Calva, B. L. G. (2004). Metales pesados y sus efectos en organismos. *Laboratorio de Ecosistemas Costeros* 33-42.

- Tun-Canto, Gibrán, Álvarez-Legorreta, Teresa, Zapata-Buenfil, Gonzalo, & Sosa-Cordero, Eloy. (2017). Metales pesados en suelos y sedimentos de la zona cañera del sur de Quintana Roo, México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 34(3), 157-169. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2017.3.433>
- Úbeda, X. (2001). Influencia de la intensidad de quemado sobre algunas propiedades del suelo después de un incendio forestal. *Revista de la sociedad española de la ciencia del suelo*, 8, 41-49.
- Vargas, A. (2014). Estudio del comportamiento del Pb, Cd, Cu y Zn después de la aplicación de compost en un suelo Typic Haplustolls cultivado con caña de azúcar.
- WRB (Base referencial mundial del recurso suelo). (2015). Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos Actualización 2015. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO, Roma.
- Wu, C. Y., Mouri, H., Chen, S. S., Zhang, D. Z., Koga, M., & Kobayashi, J. (2016). Removal of trace-amount mercury from wastewater by forward osmosis. *Journal of Water Process Engineering*, 14, 108-116.
- Yah, R. A. (2018). Biodegradación del (herbicida) ácido 2,4-diclorofenoxiacético mediante bacterias nativas de suelos agrícolas de la comunidad de San Víctor en Corozal, Belice. Chetumal, Quintana Roo.: Universidad de Quintana Roo. Tesis para obtener el grado de licenciatura.