



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS

ANÁLISIS DE LA FERTILIDAD DEL SUELO PARA EL CULTIVO DE ALFALFA EN EL DISTRITO DE RIEGO 003 TULA, EN EL ESTADO DE HIDALGO

ALINE LEYLANY DOMÍNGUEZ ISLAS

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

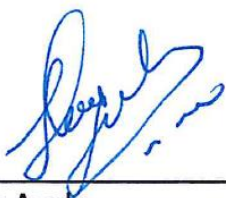
2021

La presente tesis titulada “**Análisis de la fertilidad del suelo para el cultivo de Alfalfa en el Distrito de riego 003 Tula, en el Estado de Hidalgo**”, realizada por la alumna: **Aline Leylany Domínguez Islas** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS**

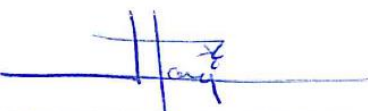
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



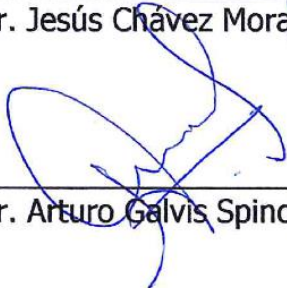
Dr. Carlos Ramírez Ayala

ASESOR



Dr. Jesús Chávez Morales

ASESOR



Dr. Arturo Galvis Spinola

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Septiembre 2021

ANÁLISIS DE LA FERTILIDAD DEL SUELO PARA EL CULTIVO DE ALFALFA EN EL DISTRITO DE RIEGO 003 TULA, EN EL ESTADO DE HIDALGO

Aline Leylany Domínguez Islas, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2021

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se evaluaron las concentraciones de P para conocer si se cumple con la demanda nutrimental de P para el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa*). También se evaluó el contenido de Cd, Pb, Cr y As en suelo y en biomasa vegetal de alfalfa para saber si supera los límites de tolerancia establecidos por Holanda para elementos contaminantes. Se hizo un muestreo aleatorio en donde se tomaron 35 muestras de suelo y tejido vegetal en parcelas del DR-003 Tula. Se realizó la caracterización físico-química de suelo mediante la determinación de densidad aparente, textura, materia orgánica, pH, CE, bases intercambiables y algunos nutrientes usando la metodología descrita en la NOM-021-RECNAT-2000. Los análisis se realizaron en el laboratorio de Laboratorio de Ciencias Ambientales del COLMERN, donde se determinaron las concentraciones de P con el método de Olsen mediante un espectrofotómetro Cintra 202, y para las concentraciones de: Cd, Cr, Pb y As se realizó digestión en un sistema cerrado utilizando un horno de microondas Multiwave PRO Anton-Para y se obtuvo la lectura con un ICP-OES (espectrofotómetro de plasma óptico acoplado inductivamente) modelo HORIBA ULTIMA. Se encontró que el contenido de P en el suelo y biomasa vegetal es óptimo para el desarrollo de la alfalfa, las concentraciones de Cr, Pb y As en suelo se encuentran dentro de los límites permisibles establecidos por Holanda, mientras que el Cd supera el 0.80 mg/kg con una concentración máxima de 1.4 mg/kg. El Cd y el Cr se encuentran en altas concentraciones en la biomasa vegetal con valores hasta 7.0 mg/kg y 7.4 mg/kg respectivamente.

Palabras clave: biomasa vegetal, elementos contaminantes, fósforo, suelos, riego con aguas negras.

SOIL FERTILITY ANALYSIS FOR ALFALFA CULTIVATION IN THE IRRIGATION DISTRICT 003 TULA, STATE OF HIDALGO

Aline Leylany Domínguez Islas, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2021

ABSTRACT

In the present research work P concentrations were evaluated to know if the nutritional demand of P for the cultivation of alfalfa (*Medicago sativa*), as well as the content of Cd, Pb, Cr and As in soil and in alfalfa plant biomass to find out if it exceeds the tolerance limits established by the Netherlands for polluting elements. A random sampling was carried out, where 35 soil and plant tissue samples were taken in plots of DR-003 Tula, the physical and chemical characterization of the soil was carried out by determining apparent density, texture, organic matter, pH, EC, interchangeable bases and some other nutrients using the methodology described in NOM-021-RECNAT-2000. The analyzes were carried out in the Laboratory of Environmental Sciences of COLMERN, where P concentrations were determined by the Olsen method using a Cintra 202 spectrophotometer, and for Cd, Cr, Pb and As concentrations a digestion was carried out in a closed system using a Multiwave PRO Anton-Para microwave oven and the reading was obtained with an ICP-OES (Inductively Coupled Optical Plasma Spectrophotometer) model HORIBA ULTIMA. It was found that P content in the soil and plant biomass is optimal for the development of alfalfa, the concentrations of Cr, Pb and As in soil are within the permissible limits established by the Netherlands, while Cd exceeds 0.80 mg / kg with a maximum concentration of 1.4 mg / kg. Cd and Cr are found in higher concentrations in plant biomass with values up to 7.0 mg / kg and 7.4 mg / kg respectively.

Keywords: plant biomass, polluting elements, phosphorus, soils, sewage irrigation

DEDICATORIA

A Elizabeth Trujillo Trujano por llegar a mi vida y sacar la mejor versión de mí, por estar en las buenas, en las malas y en las peores, por motivarme cada día para terminar esta etapa y por ser parte de mi familia junto con Nairobi (Chiqui), Zoe y Beggie.

A mi madre Herlinda Islas Zambrano y a mi padre José Manuel Domínguez Ramírez, a los dos, por ser el pilar de mi vida y dejarme volar sola.

A mis hermanos Yissel y Julio César gracias por su apoyo y por ser parte fundamental de mi vida.

A mi tía Alicia Domínguez Ramírez que ha sido una inspiración y ejemplo de vida, tanto profesional como personalmente, gracias por ser, tía. Te quiero mucho.

A Leylany, por ser resiliente en cada momento de su vida.

AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de Postgraduados, al Campus Montecillo y al Posgrado de Hidrociencias por permitirme cumplir una meta más en mi desarrollo académico y personal.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por haberme brindado el financiamiento que me permitió desarrollar mis estudios durante dos años.

Al Dr. Arturo Gálvis Spinola, por su apoyo incondicional, su infinita paciencia, su gran conocimiento y por todo el tiempo que dedicó para guiarme a lo largo de mi investigación.

Al Dr. Carlos Ramírez Ayala, por su confianza, su disposición y su tiempo para culminar este proceso.

Al Dr. Jesús Chávez Morales, por formar parte de mi Consejo Particular, por su comentarios para hacer un mejor escrito y su disposición para apoyarme en la culminación de esta investigación.

Al Dr. Roberto Ascencio Hernández, por fungir como mi sinodal, en éste trabajo de investigación.

Al Dr. Enrique Mejía Sáenz (†) por su confianza hacia mí y ser parte fundamental de esta investigación, aunque ya no esté con nosotros siempre lo tendré presente.

Al Dr. Francisco Gavi Reyes (†) por tener la suerte de haber sido su alumna, por el apoyo brindado, su disposición, sus consejos y aunque haya trascendido ya a otro plano, siempre lo recordaré con cariño, por ser tan excelente profesor y gran ser humano.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE CUADROS	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	2
II.1. Objetivos	2
II.2. Hipótesis	2
III. REVISIÓN DE LITERATURA	3
III.1. Aguas residuales y agricultura	3
III.2. Uso de aguas residuales en la producción de cultivos	3
III.3. El fósforo en el suelo	5
III.4. El fósforo en la planta (Alfalfa)	6
III.5. Elementos contaminantes provenientes del uso de aguas residuales	8
III.6. Elementos contaminantes en el suelo y tejido vegetal	9
III.7. Experiencias en el uso de aguas residuales en el DR-003 Tula	11
IV. MATERIALES Y METODOS	15
IV.1. MUESTREO DE SUELO	19
IV.1.1. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO	21
IV.1.1.1. Determinación de pH y CE	21
IV.1.1.2. Determinación de Materia Orgánica	21
IV.1.1.3. Determinación de Textura	22
IV.1.1.4. Densidad Aparente	24

IV.1.1.5.	Determinación de S	25
IV.1.1.6.	Determinación de N inorgánico	25
IV.1.1.7.	Determinación de B	26
IV.1.1.8.	Determinación de Ca, Mg, Na y K.....	26
IV.1.1.9.	Determinación de P	27
IV.1.1.10.	Determinación de metales contaminantes y microelementos (Pb, Cd, As, Cr, Fe, Mn, Zn y Cu).....	28
IV.2.	MUESTREO DE PLANTA.....	29
IV.2.1.	Preparación de la muestra	31
IV.2.2.	Método de calcinación.....	31
IV.2.3.	Determinación de As, Cd, Pb y Cr: por Incineración y espectrofotometría de absorción atómica.....	33
IV.3.	Análisis estadístico	34
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
V.1.	CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL SUELO	35
V.2.	CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL SUELO	37
V.3.	Fósforo en suelo y tejido vegetal	48
V.4.	Elementos contaminantes en Suelo y Tejido Vegetal	54
VI.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	68
VII.	LITERATURA CITADA	69

LISTA DE FIGURAS

Figura IV.1. Localización del DR-003 Tula.	15
Figura IV.2. Localización de los puntos de muestreo en el DR-003 Tula.	18
Figura IV.3. Toma de muestra de suelo.	19
Figura IV.4. Secado de muestra de suelo.	20
Figura IV.5. Lectura de pH y CE con Potenciómetro Orion 5 Start.	21
Figura IV.6. Determinación de materia orgánica utilizando titulador automático eppendorf top buret M.	22
Figura IV.7. Mezcla de muestra con esquimera.	23
Figura IV.8. Toma de lectura de la muestra con hidrómetro.	24
Figura IV.9. Filtrado de solución para determinar S.	25
Figura IV.10. Toma de lectura con Espectrofotómetro Cintra 202 a una longitud de onda 882 nm.	27
Figura IV.11. Digestión en un sistema cerrado utilizando un horno de microondas Multiwave PRO Anton-Paar.....	28
Figura IV.12. Lectura de muestra con espectrofotómetro de plasma óptico modelo HORIBA ULTIMA.	29
Figura IV.13. Muestreo de biomasa vegetal en el DR-003 Tula.	30
Figura V.1. Concentraciones de fósforo en las muestras de suelo colectadas en el DR-003 Tula.	51
Figura V.2. Mapa de distribución de fósforo (P) en el DR-003 Tula.	52
Figura V.3. Concentraciones de P en las muestras de tejido vegetal colectadas en el DR-003 Tula.	53
Figura V.4. Concentraciones de Cd en las muestras de suelo colectadas en el DR- 003 Tula.	57
Figura V.5. Mapa de distribución de Cadmio (Cd) en el DR-003 Tula.	58

Figura V.6. Concentraciones de Pb en las muestras de suelo colectadas en el DR-003 Tula.	59
Figura V.7. Mapa de distribución de Plomo (Pb) en el DR-003 Tula.....	60
Figura V.8. Concentraciones de Cr en las muestras de suelo colectadas en el DR-003 Tula.	61
Figura V.9. Mapa de distribución de Cromo (Cr) en el DR-003 Tula.....	62
Figura V.10. Concentraciones de Cd en las muestras de tejido vegetal colectadas en el DR-003 Tula.	65
Figura V.11. Concentraciones de Pb en las muestras de tejido vegetal colectadas en el DR-003 Tula.	66
Figura V.12. Concentraciones de Cr en las muestras de tejido vegetal colectadas en el DR-003 Tula.	67

LISTA DE CUADROS

Cuadro III.1. Rango óptimo de macronutrientes y micronutrientes en alfalfa en estado vegetativo. Corresponde a los primeros 15 cm de la parte aérea.	7
Cuadro IV.1. Muestras de suelo y tejido vegetal colectadas en el DR-003 Tula.	16
Cuadro IV.1, continuación...	17
Cuadro V.1. Valores de densidad aparente y textura de las muestras de suelos colectadas en el DR-003 Tula.	35
Cuadro V.1, continuación...	36
Cuadro V.2. Valores de pH, CE y materia orgánica de las muestras de suelos colectadas en el DR-003 Tula.	38
Cuadro V.2, continuación...	39
Cuadro V.3. Concentración de bases intercambiables en las muestras de suelo colectadas en el DR-003 Tula.	41
Cuadro V.3, continuación...	42
Cuadro V.4. Concentración de nitrógeno orgánico en las muestras de suelo colectadas en el DR-003 Tula.	43
Cuadro V.4, continuación...	44
Cuadro V.4, continuación...	45
Cuadro V.5. Concentración de Potasio, calcio, magnesio, azufre, hierro, boro, manganeso, zinc y cobre en las muestras de suelo colectadas en el DR-003 Tula.	45
Cuadro V.5, continuación...	46
Cuadro V.5, continuación...	¡Error! Marcador no definido.
Cuadro V.6. Concentraciones de fósforo en las muestras de suelo y tejido vegetal colectadas en las parcelas del DR-003 Tula.	48
Cuadro V.6, continuación...	49

Cuadro V.7. Análisis estadístico para la concentración de P en suelo y tejido vegetal en las muestras colectadas en el DR-003 Tula.	50
Cuadro V.8. Concentraciones de Cadmio, Plomo, Cromo y Arsénico en las muestras de suelo y tejido vegetal colectadas en las parcelas del DR-003 Tula.	54
Cuadro V.8, continuación... ..	55
Cuadro V.9. Umbral que denota contaminación por cromo (Cr), arsénico (As), cadmio (Cd) y plomo (Pb) y su contraste con el resultado de las muestras de suelo colectadas en el Distrito de Riego 003, Tula.....	56
Cuadro V.10. Comparación de concentraciones de Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Cromo (Cr) y Arsénico (As) en tejido vegetal respecto a otros autores.....	63
Cuadro V.11. Análisis estadístico para la concentración de Cd, Pb y Cr en suelo y tejido vegetal en las muestras colectadas en el DR-003 Tula.	64

I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural indispensable para la vida humana. A nivel global la agricultura presenta serios problemas debido a la falta de agua, sobre todo en zonas donde escasea este recurso. Por lo que una de las alternativas para tratar de remediar en parte la falta de agua, es aprovechar el agua residual para riego agrícola, generada tanto por la población urbana como por las industrias.

Desde 1890 el agua residual ha sido utilizada para la agricultura de regadío en el Valle del Mezquital (FAO, 2013), favoreciendo el desarrollo agrícola de la región. El DR003 Tula, tiene una superficie aproximada de 50, 000 hectáreas, siendo los principales cultivos el Maíz (*Zea mays*) y Alfalfa (*Medicago sativa*), representa una de las zonas más importantes del país en cuanto al rehúso de aguas residuales en México.

El principal beneficio, además de la fuente de riego que significa usar aguas negras, es el incremento en la productividad agrícola, como consecuencia del aporte de materia orgánica y nutrientes a los suelos. El problema que puede suscitar el riego con aguas residuales es el que está relacionado con la presencia de elementos contaminantes, los cuales pueden acumularse en el tejido vegetal de los cultivos y así incorporarse a la cadena trófica.

Por lo que en esta investigación se evaluaron las concentraciones de fósforo extractable en suelo y biomasa (P), y metales pesados (Cr, Pb, As, Cd) en los terrenos agrícolas irrigados con aguas residuales procedentes el Valle de México, y su acumulación en el tejido vegetal de los alfalfares de la zona del Distrito de Riego 003 Tula en el Estado de Hidalgo.

II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

II.1. Objetivos

- Evaluar la concentración de P en terrenos agrícolas irrigados con aguas negras procedentes del Valle de México, así como su acumulación en la biomasa total de alfalfares de la región.
- Evaluar la presencia de Cd, Pb, Cr y As en muestras de suelo y biomasa de alfalfa, colectadas en terrenos agrícolas irrigados con aguas negras procedentes del Valle de México.

II.2. Hipótesis

- La concentración del fósforo en los terrenos agrícolas evaluados es suficiente para satisfacer la demanda nutrimental en los alfalfares de la zona del Distrito de Riego 003 Tula.
- La concentración de Cd, Pb, Cr y As en los terrenos agrícolas evaluados en el Distrito de Riego 003 Tula, supera los límites de tolerancia establecidos por la Unión Europea.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

III.1. Aguas residuales y agricultura

Las aguas residuales contienen material suspendido y componentes disueltos, tanto orgánicos como inorgánicos. La presencia de ciertas formas de nutrientes en las aguas residuales beneficiaría más a algunos cultivos que a otros, algunos cultivos, como forrajes perennes, y cultivos, como el maíz, la alfalfa, el sorgo y la cebada, requieren una elevada capacidad de asimilación de nutrientes, alto consumo de agua, elevada tolerancia a la humedad del suelo, baja sensibilidad a los constituyentes del agua residual y mínima necesidad de control.

La intensidad de la absorción de nutrientes va a depender de las necesidades de la planta condicionadas mediante la regulación bioquímica de los sistemas de aprovechamiento, transferencia y asimilación de los nutrientes que son requeridos por cada etapa fenológica. Pero la disponibilidad de nutrientes de la solución del suelo se configura para ser aprovechada por las plantas y los demás organismos que cohabitan en el medio.

Sólo ciertos elementos son esenciales para las plantas. Un elemento esencial se define como un elemento que es un componente intrínseco en la estructura o en el metabolismo de una planta y cuya ausencia causa anomalías, en el crecimiento, desarrollo y/o reproducción de la planta. Por lo tanto, si a una planta se le proporciona todos los elementos esenciales, así como agua y la luz del sol, será capaz de sintetizar todos los compuestos que necesita para su crecimiento normal (Pérez F. , 2017).

III.2. Uso de aguas residuales en la producción de cultivos

La agricultura es el principal sector consumidor de recursos hídricos; la disponibilidad hace que en algunas zonas sea necesario emplear aguas residuales (Silva, Torres, & Madera, 2008).

De acuerdo con la FAO, la superficie efectivamente regada a nivel mundial es de 2,75 millones de km² de tierra. Con los aproximadamente 330 km³ de aguas residuales municipales que se generan cada año se podrían regar 40 millones de hectáreas (con

aproximadamente 8.000 m³ por hectárea) o el 15% de todas las tierras de regadío (Mateo-Sagasta, Raschid-Sally, & Thebo, 2015).

El uso común de aguas residuales en la agricultura es uno de los recursos más valiosos para los países en vías de desarrollo. El uso de estas aguas además de ampliar la frontera agrícola, incrementan la producción y el rendimiento por hectárea del cultivo, se disminuyen los costos de insumos, como fertilizantes, además de la mejora del suelo con la materia orgánica presente y preservación del medio ambiente (Lazcano Carreño, 2016).

(Plevich, Delgado, Tarico, Crespi, & Barotto, 2012), realizaron una investigación en Argentina, donde analizaron la producción de biomasa aérea, la eficiencia de uso de agua y el valor nutritivo de alfalfa cultivada aplicando riego con agua residual urbana, agua de perforación subterránea y un testigo (precipitaciones). Mostraron que la alfalfa regada con agua de perforación subterránea supero en 24% de biomasa aérea el tratamiento con agua de precipitación y a su vez el uso de aguas residuales urbanas superó en un 19% a la regada con perforación, también se determinó que la alfalfa regada con el agua residual urbana supera los valores nutritivos del cultivo que crece en condiciones sin riego. Se puede concluir que el agua residual urbana representa otra posible fuente de agua, factible de ingresar al suelo y estar a disposición para el cultivo de alfalfa.

(Lara & Hernández, 2021), realizaron un experimento en España, donde aplicaron agua residual a los cultivos de calabacín, sandía, avellanos o cítricos y los compararon con datos reportados por Fertiberia, donde demostraron que se puede optimizar la productividad mediante el contenido de nutrientes en el agua residual reduciendo el uso de abonados químicos.

En Portugal se desarrolló un estudio experimental sobre el uso de efluentes de PTAR compuestas por sedimentación primaria y secundaria y lagunas facultativas, en cultivos de sorgo, maíz y girasol, aplicando riego por gravedad y por goteo. Los rendimientos de los cultivos regados con estos efluentes fueron muy similares a los obtenidos al regar solo con agua potable y al utilizar fertilizantes comerciales, lo que indica que el contenido

de N de los efluentes del alcantarillado tiene un valor de fertilización igual a los fertilizantes comerciales, cuando el agua residual tratada se usa para riego (Bau, 1991).

(Osorio, 2006), realizó una evaluación teórica de opciones de oferta de agua para riego de cultivos en distritos agroalimentarios proyectados en el Valle del Cauca, tomando como caso de estudio el distrito agroalimentario de Palmira. Los resultados reafirman la viabilidad del uso de las aguas residuales domésticas para riego agrícola, en términos de disponibilidad y control de impacto por las actividades productivas.

Ante la creciente demanda de productos agrícolas básicos, los agricultores están investigando fuentes de agua no convencionales. Debido a su alto contenido de nutrientes, las aguas residuales domésticas y municipales son una opción atractiva especialmente en los lugares en los que los recursos hídricos convencionales son escasos o insuficientes.

III.3. El fósforo en el suelo

El fósforo es absorbido por el cultivo en distintas formas aniónicas, cuyo predominio depende del pH del suelo por lo que en la región predomina la forma HPO_4^{2-} . La reacción del fósforo en suelos neutros y alcalinos se lleva a cabo en minerales de calcio formando compuestos de fosfato de calcio insolubles. Este nutriente prácticamente no se mueve, queda disponible sólo en el sitio donde quedó después de haber sido agregado ya sea a través del riego o por la adición de algún insumo. Por ello, si no se adiciona cerca de la raíz la eficiencia de su aprovechamiento será baja. La planta absorbe el azufre en forma de ión sulfato (SO_4^{2-}). En zonas donde abunda el ácido sulfhídrico (H_2S) propicia que este nutriente sea absorbido por las hojas. El fósforo (P) tiene un rol fundamental en la fijación biológica del nitrógeno (N). Tanto el número como el tamaño de nódulos y la cantidad de N fijado, está positivamente relacionado con la cantidad de P disponible, es un macronutriente que tiene alto impacto en la productividad, calidad y persistencia de la alfalfa (Berardo, A.; Marino, M. A.; Erht, S., 2007).

III.4. El fósforo en la planta (Alfalfa)

(Vivas & Quaino, 1999), realizaron una investigación en centro este de Santa Fe en Argentina, que consistió en evaluar la producción de alfalfa en dos suelos con bajos contenidos de P extractable para relacionar la producción total de MS con el P y la enmienda cálcica aplicados al momento de la siembra y estimar el P extractable en la primavera. El suelo contenía 2.4% de materia orgánica, 6 ppm de P y un pH de 5.9. Los niveles de P 0, 40, 80 y 140 kg/ha en la forma de superfosfato triple de calcio (SFT) y la enmienda cálcica a razón de 0 y 2000 kg/ha. Los niveles crecientes de fertilización fosfatada produjeron aumentos significativos en la materia seca de alfalfa con: 75% de rendimiento se tiene entre 27-37 ppm P extractable, 80% de rendimiento se tiene entre 34-44 ppm P extractable, 90% de rendimiento se tiene entre 46-59 ppm P extractable, en el suelo.

(Berardo & Marino, 2001), realizaron un experimento en el que se evaluó el efecto de la fertilización fosfatada en la alfalfa sobre los cambios en los niveles de fósforo extraíble posteriores a la fertilización y su relación con la producción de forraje en un suelo con 10.3 ppm de P, 6.2 de pH y 6.4% de materia orgánica. Se aplicaron cuatro niveles de fertilizante fosfatado (0, 25, 50 y 100 kg P ha⁻¹) bajo la forma de superfosfato triple (SFT, 20 % de P) y uno con 100 kg P ha⁻¹ aplicado anualmente. La fertilización fosfatada en el cultivo de alfalfa incrementó significativamente. En función de la relación existente entre los contenidos de fósforo extraíble y la producción de MS de alfalfa, se logran niveles de producción óptimos con valores cercanos a 25 ppm de P en el suelo.

(Quiñonez, Romero, Dalla Fontana, Longoni, & Colombo, 2008), realizaron un experimento en la región centro de Argentina, el suelo tenía una concentración de 16.65 ppm de fósforo asimilable (Ps), aplicaron diferentes dosis de fósforo utilizando abono fosfatado en 2 años de cultivo, concluyeron que el P fue el elemento que permitió mantener una producción elevada y estable de la alfalfa a través de las dos estaciones de producción.

(Pautasso & Barbagelata, 2017), realizaron ensayos para determinar el nivel crítico de P Bray para obtener el 90% de rendimiento relativo de fertilización fosfatada en pasturas

de alfalfa con dosis agregadas de 0 y 60 kg P por hectárea como superfosfato triple de calcio (SFT, 0-20-0), y 0 y 20 kg de P ha⁻¹. El análisis de suelos se realizó antes de la aplicación del fertilizante químico, previo al momento de la siembra. El análisis se repitió al año de la implantación de las pasturas, la profundidad de muestreo fue de 0-20 cm. Finalmente estimaron que para obtener tal rendimiento del 90% de alfalfa en la zona, el suelo debe tener 18.1 mg/kg.

El análisis de planta es una herramienta de diagnóstico del estado nutricional de la planta útil en la medida que se posea adecuada información sobre los rangos óptimos de cada nutriente en cuestión. Los rangos óptimos deben estar asociados a una precisa definición sobre el estado fenológico así como la parte de la planta que debe ser analizada. No existe información nacional sobre rangos óptimos en alfalfa por lo que en esta investigación se basó en información internacional.

Cuadro III.1. Rango óptimo de macronutrientes y micronutrientes en alfalfa en estado vegetativo. Corresponde a los primeros 15 cm de la parte aérea.

Macronutriente	Rango óptimo
N	4.5-5.0 %
S	0.26-0.50 %
P*	0.26-0.70 %
Mg	0.30-1.0 %
Ca	1.8-3.0 %
K	2.0-3.5 %
Mn	31 -100 mg/kg
Zn	21 – 70 mg/kg
Cu	7 – 30 mg/kg
B	30 – 80 mg/kg
Mo	1.0 – 5.0 mg/kg
Fe	30 – 250 mg/kg

Fuente: (Mills, Benton Jones, & Wolf, 1996) citado por (Morón, 2021)

III.5. Elementos contaminantes provenientes del uso de aguas residuales

Las aguas residuales están formadas por 99.9% de agua y 0.1% de otros materiales sólidos en suspensión, coloidales o disueltos, que contienen los principales nutrientes de las plantas (nitrógeno, fósforo y potasio) y también micronutrientes (cobre, hierro y zinc) (Duncan & Cairncross, 1990).

El uso de aguas residuales en la agricultura provoca que exista la presencia de nutrientes, organismos patógenos, elementos y sustancias químicas recalcitrantes que pueden representar riesgos a la salud pública (FAO, La contaminación del suelo: Una realidad oculta, 2019).

Estos elementos que están normalmente presentes en bajas concentraciones en suelo o plantas, pueden ser o no esenciales para el crecimiento y desarrollo de plantas, animales y el hombre. (García, Plaza, Muñoz, & Polo, 2000).

Si bien en esta investigación analizaremos al Cadmio, Plomo, Cromo y Arsénico, los cuales están libres de manera natural en concentraciones variables o como consecuencia de diversas actividades humanas, son los más peligrosos por el daño que ocasionan (Hogan, 2010).

El Cadmio (Cd): es un elemento con número atómico de 48 y una densidad de 8.64 g/cm³. Se le usa principalmente en la fabricación de baterías y pinturas, en el recubrimiento de superficies metálicas para protegerlas de la oxidación, como componente de aleaciones para soldaduras de bajo punto de fusión y en la industria química en procesos catalíticos, su desecho hacia el drenaje hace que esté presente en las aguas residuales.

El Plomo (Pb): Su número atómico es 82 y densidad de 11.3 g/cm³, se encuentra en la corteza terrestre, donde se encuentra la galena, la anglesita y la cerusita, usado en la fabricación de canalizaciones, como antidetonante en las gasolinas, en la industria química y de armamento, y como blindaje contra radiaciones, causando serios problemas de salud pública a todos los que se encuentran expuestos.

El Cromo (Cr): Elemento químico metálico, de número atómico 24, de color blanco plateado, brillante, duro y quebradizo, escaso en la corteza terrestre, donde se encuentra generalmente en forma de óxido, que se emplea como protector de otros metales por su resistencia a la corrosión, y cuyas sales, de variados colores, se usan como mordientes. El Cromo entra en el aire, agua y suelo a través de procesos naturales y actividades humanas. Las mayores actividades humanas que incrementan las concentraciones de Cromo son el acero, las peleterías y las industrias textiles, pintura eléctrica y otras aplicaciones industriales.

El Arsénico (As): Es un elemento químico con número atómico 33 y una densidad de 5.73 g/cm^3 , es un sólido frágil, cristalino y semimetálico que se deslustra cuando se expone al aire. El arsénico puro se encuentra en la forma amarilla o gris metálica, cuyas densidades relativas son ligeramente distintas. Algunos de los usos del arsénico son para el revestimiento de bronce, la pirotecnia y el endurecimiento y mejora de perdigones. Sus compuestos se han usado en insecticidas y venenos en la agricultura.

III.6. Elementos contaminantes en el suelo y tejido vegetal

Un suelo contaminado es aquel que ha excedido su capacidad de amortiguación para una o varias sustancias y, como consecuencia, pasa de actuar como un sistema protector a ser causa de problemas para el agua, la atmósfera, y los organismos. Al mismo tiempo se modifican sus equilibrios biogeoquímicos y aparecen cantidades anómalas de determinados componentes que originan modificaciones importantes en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Tan, 2009).

En lugares donde se ha utilizado agua residual para riego agrícola, se reporta una tendencia creciente en las concentraciones de Cd, Pb, Cr y As.

Estos elementos se encuentran en el suelo generalmente como componentes naturales de la corteza terrestre, en forma de minerales, sales u otros compuestos. Pueden ser absorbidos por las plantas y así incorporarse a las cadenas tróficas, estos compuestos

no son biodegradables por lo que pueden acumularse en las plantas y causar toxicidad sobre cultivos.

La movilización de estos elementos en el ambiente, suelo y en organismos es una condicionante importantes de sus características de bioacumulación, transferencia hacia otros organismos en la cadena trófica, su potencial tóxico y sus efectos (Acosta, A., 2007). Cualquier elemento que se encuentre depositado en el suelo, no necesariamente está disponible para la planta, ya que la absorción de estos elementos, depende de varios factores y características físico-químicas del suelo como el pH, Textura, etc (Fitter & Kay R., 1987)

- pH. La mayoría de estos elementos metálicos tienden a estar más disponibles a pH ácido, excepto As, Mo, Se y Cr. Directa o indirectamente, el pH afecta varios mecanismos de la retención del metal por el suelo. El pH es un parámetro muy importante que tiene influencia en los procesos de sorción-desorción, precipitación y disolución, la formación de complejos y reacciones de óxido-reducción.
- Textura. La arcilla tiende a adsorber a los metales pesados, que quedan retenidos en sus posiciones de cambio.
- Materia orgánica. La formación de complejos por la materia orgánica del suelo es uno de los procesos que intervienen en la capacidad de solubilidad y asimilabilidad de metales pesados por las plantas; la toxicidad de los metales pesados aumenta en gran medida por su fuerte tendencia a formar complejos organometálicos, facilitando con ello, su solubilidad, disponibilidad y dispersión.
- Las formas solubles y cambiables de metales pesados en el agua se consideran fácilmente móviles y disponibles para las plantas, mientras que los metales incorporados en las estructuras cristalinas de las arcillas parecen relativamente inactivos (Ahumada, et al., 1999).

III.7. Experiencias en el uso de aguas residuales en el DR-003 Tula

El principal uso del agua en México es el agrícola, la superficie dedicada a las labores agrícolas en México varía entre los 20 y 25 millones de hectáreas, con una superficie cosechada de entre 15 a 20 millones de hectáreas por año. El valor de la producción directa equivale al 6.5 del PIB nacional. La población ocupada en la agricultura oscila entre 4 y 5 millones de personas y se estima que dependen directamente de la actividad entre 20 y 25 millones de mexicanos, en su mayoría población rural (Conagua, 2011)

Desde 1890 el agua residual se utiliza para la agricultura de regadío en el Valle del Mezquital (FAO, 2013), favoreciendo el desarrollo agrícola de la región, lo que la sitúa como una de las zonas más importantes del país en cuanto al uso de aguas residuales en México. El agua que se comenzó a reusar en riego agrícola no recibió ningún tratamiento previo. Sin embargo, su conducción y distribución a lo largo de aproximadamente 80 km, que es la distancia aproximada entre la Ciudad de México y la presa Endhó (que posee una capacidad de almacenamiento de alrededor de 202Hm³), favorecía que se desarrollara un proceso de aireación y sedimentación, lo que puede equipararse con un tratamiento primario (Cisneros Estrada & Saucedo Rojas, 2016).

Existen diversas investigaciones en las cuales han evaluado y dado prioridad a la contaminación de los suelos agrícolas por el uso de aguas residuales como fuente de riego, así como el impacto en las características físicas y químicas del suelo incluyendo la acumulación y distribución de metales pesados tanto en suelo como en cultivos.

(Siebe, 1994), realizó un experimento en el que comparó la concentración de metales pesados en suelos irrigados con aguas residuales y suelo irrigados con agua de pozo, así como las concentraciones en alfalfa y grano de maíz, mediante un muestreo de suelos a una profundidad de 0-60 cm. Se determinaron concentraciones de: 6-50 mgkg⁻¹ de Pb, 0.12-1.55 mgkg⁻¹ de Cd, 56-165 mgkg⁻¹ de Zn, 12-41 mgkg⁻¹ de Cu, 23-111 mgkg⁻¹ de Cr. Las muestras de grano de maíz colectadas en los sitios regados con agua residual manifestaron concentraciones en promedio de 0.033 mgkg⁻¹ de masa seca de Pb, 0.033 mgkg⁻¹ de Cd, 1.44 mgkg⁻¹ de Cu y 32.5 mgkg⁻¹ de Zn, mientras que en los sitios de temporal las concentraciones de Pb estuvieron bajo el límite de detección (0.02

mgkg⁻¹ masa seca), las de Cd fueron de 0.008 mgkg⁻¹, las de Cu de 1.54 mgkg⁻¹ y las de Zn de 26.3 mgkg⁻¹. En las muestras de tejido vegetal de alfalfa se determinó mayor contenido de Cd, Pb, Cr y Zn, pero menor de Cu en el promedio de las muestras tomadas en sitios regados con agua residual, en comparación con aquellas colectadas bajo riego con agua de pozo. Finalmente los metales pesados Cd, Pb, Cr y Zn introducidos en los suelos a través del riego con agua residual tienden a acumularse en la capa arable de los suelos, y aunque no se encontró un riesgo para el potencial productivo de los suelos y las plantas, pone en evidencia que deben ponerse límites en el uso de aguas residuales para el riego, ya que estos metales tienden a acumularse en la capa arable y pueden ser absorbidos por los cultivos.

Un estudio similar realizado por (Vázquez Alarcón, Justin Cajuste, Siebe Grabach, Alcántar González, & De las Isla de Bauer, 2001), con la finalidad de diagnosticar el proceso de acumulación y variabilidad en las concentraciones de Cd, Ni y Pb agua y suelo, y en las especies: maíz (*Zea mays* L.), trigo (*Triticum aestivum*) y alfalfa (*Medicago sativa*), encontraron que la concentración de Cd en el agua superó el valor máximo permisible de calidad del agua para riego agrícola. La cantidad de Cd que se acumuló anualmente en el suelo es de 384 a 640 g ha⁻¹, considerada como una tasa de acumulación alta, así mismo también tiende a acumularse mayormente en alfalfa y maíz, mientras que la asociación Cd y Ni tiende a acumularse en la hoja y grano de trigo, lo que indica un riesgo potencial para la salud. Las concentraciones de Cd, Ni y Pb en el suelo, se asoció con la antigüedad de riego con agua residual.

(Prieto-García, Lucho Constantino, Poggi Valardo, Álvarez Suárez, & Barrado Esteban, 2007), elaboraron un estudio de caracterización fisicoquímica y de extracciones secuenciales selectivas de metales trazas, tóxicos y no biodegradables y el metaloide arsénico, en los suelos de la zona Actopan-Ixmiquilpan. La caracterización fisicoquímica de suelo se realizó mediante determinaciones de texturas de suelos, materia orgánica, pH, entre otros, para clasificar los suelos; paralelamente se realizaron evaluaciones de extracciones secuenciales selectivas de metales trazas (Pb, Cd, Cr y Hg) y del metaloide As. El agua residual usada en el DR03 presenta concentraciones de metales traza, metaloide As y B dentro de los límites establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996,

pero con el paso del tiempo pueden ser acumulados en las capas arables de los suelos pasando a la cadena alimentaria en los cultivos de la región. Mostraron que existe una correlación directa entre el contenido de materia orgánica y los años de riego, lo que posibilita que los metales lixiviables en medios de pH moderadamente alcalinos, formen complejos solubles con metales. En cuanto a los metales trazas, tóxicos y peligrosos, se encontraron cantidades apreciables de Pb en todas las series de suelos y que lixivian en las fracciones solubilizables en agua y/o intercambiables, lo cual constituye un peligro potencial por la posible bioacumulación en cultivos.

(Carrillo G. & Cajuste J., 1995), realizaron un estudio para determinar el comportamiento de metales pesados en suelos del Distrito de Riego 003, Tula, Hidalgo, México. Se recogieron muestras de agua, suelos y plantas (alfalfa) en parcelas regadas con aguas residuales con una parcela irrigada con agua subterránea como control. Determinaron que las concentraciones de Cd, Fe y N en agua, estaban por encima del límite permisible fijado por las leyes mexicanas para las muestras de suelo de los sitios regados con agua residual, las concentraciones de Cu fueron tres veces mayores y en otras parcelas los niveles fueron diez veces mayores, que las determinadas en la parcela irrigada con agua subterránea. Mientras que la concentración de Pb y Cd en tejidos vegetales de alfalfa de sitios con riego con agua residual el promedió 8.5 y 0.55 mg kg⁻¹, lo que sugiere un potencial de fitotoxicidad por metales pesados.

(Lucho-Constantino, Prieto-García, Del Razo, Rodríguez Vázquez, & Poggi-Varaldo, 2005), evaluaron la acumulación de oligoelementos (boro, cadmio, cromo, mercurio, plomo y arsénico) en suelos agrícolas de la Zona del Distrito de Riego 03 (DR03). Las concentraciones totales de los elementos analizados fueron de 0,51–1,89 mg Cd kg⁻¹, 11,59–27,42 mg Cr kg⁻¹, 3.99–47.08 mg Pb kg⁻¹ y 9,2–123,8 mg B kg⁻¹. Las muestras de la parte superior del suelo (0-30 cm) Las concentraciones de arsénico total y mercurio estuvieron por debajo de los límites de detección (0,03 y 0,01 mg kg⁻¹, respectivamente) excepto 0,77 mg Hg kg⁻¹ en un solo suelo. Las concentraciones de Cr y Pb totales no superaron los niveles máximos permisibles establecidos por la normativa de la Unión Europea, mientras que el Cd total estaba al borde. Se puede concluir que los suelos pueden representar un riesgo potencial para la cadena trófica y se deben considerar

restricciones efectivas para el cultivo de cultivos que son sensibles o se sabe que acumulan metales pesados (es decir, nopal, cebolla, ajo, lechuga, papas, remolacha y nabos).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo presenta los materiales y la metodología para realizar en análisis de suelo y planta en el distrito de Riego 003 Tula, en el Estado de Hidalgo, para determinar el análisis de suelo se llevó a cabo con base en la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002) y Manual de análisis de suelos y tejido vegetal (CIAT, 1993) y en cuanto al análisis de tejido vegetal se llevó a cabo la metodología descrita en “Métodos y análisis de tejidos Vegetales” (Sadzawka R., Grez Z., Carrasco R., & Mora G., 2004).

El Distrito de Riego 003-Tula se sitúa entre los paralelos 19° 40' y 20° 29' de latitud norte y los meridianos 99° 27' y 99° 57' de longitud oeste, con una altitud media de 1,985m; cubre la región conocida como Valle del Mezquital al Centro–Suroeste del Estado de Hidalgo.

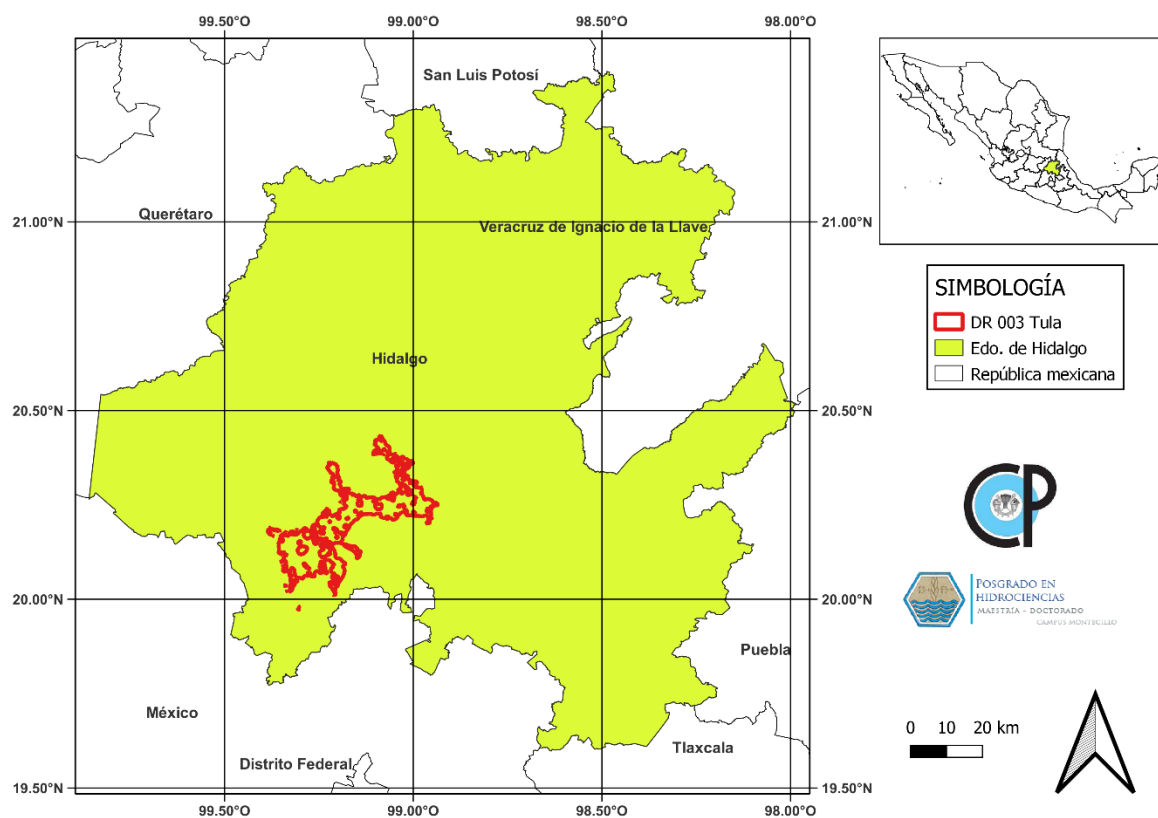


Figura IV.1. Localización del DR-003 Tula.

El muestreo se programó mediante la recopilación de información disponible de la región y recorridos de campo previos, de tal manera que para la selección de sitios se identificaron zonas representativas del área de estudio con el propósito de conocer las condiciones actuales, prácticas habituales, y prever condiciones para una buena preservación de muestras.

El muestreo se realizó con base en dos criterios: a) la zona donde se ubica el 90% de las raíces de los cultivos responsables de la absorción de agua y especies iónicas; b) dada la escasa movilidad de la mayoría de los elementos químicos (nutrientes y tóxicos) da como consecuencia que la mayor concentración se encuentre en la capa arable en ambos casos.

Cuadro IV.1. Muestras de suelo y tejido vegetal colectadas en el DR-003 Tula.

No. de muestra	Altitud (msnm)	Longitud (°)	Latitud (°)
1	2053	-99.250	20.133
2	2159	-99.200	20.333
3	2128	-99.217	20.183
4	1942	-99.183	20.283
5	2074	-99.000	20.217
6	2209	-99.183	20.150
7	2011	-99.083	20.217
8	2050	-99.300	20.133
9	2101	-99.050	20.250
10	2038	-99.233	20.167
11	2103	-99.117	20.200
12	2087	-99.233	20.083
13	2055	-99.350	20.167
14	2032	-99.300	20.150
15	2076	-99.250	20.100
16	2067	-99.283	20.117

Cuadro IV.2, continuación...

No. de muestra	Altitud (msnm)	Longitud (°)	Latitud (°)
17	2246	-99.017	20.350
18	2084	-99.283	20.067
19	2052	-99.333	20.133
20	2082	-99.217	20.183
21	2007	-99.267	20.200
22	2059	-99.317	20.117
23	2070	-99.317	20.100
24	2091	-99.217	20.150
25	2023	-98.964	20.201
26	2025	-99.233	20.183
27	2097	-99.150	20.133
28	2137	-99.100	20.217
29	2079	-99.150	20.200
30	1935	-99.095	20.396
31	2065	-99.334	20.075
32	2050	-99.067	20.233
33	2008	-99.117	20.250
34	2108	-99.083	20.217
35	2071	-99.233	20.117

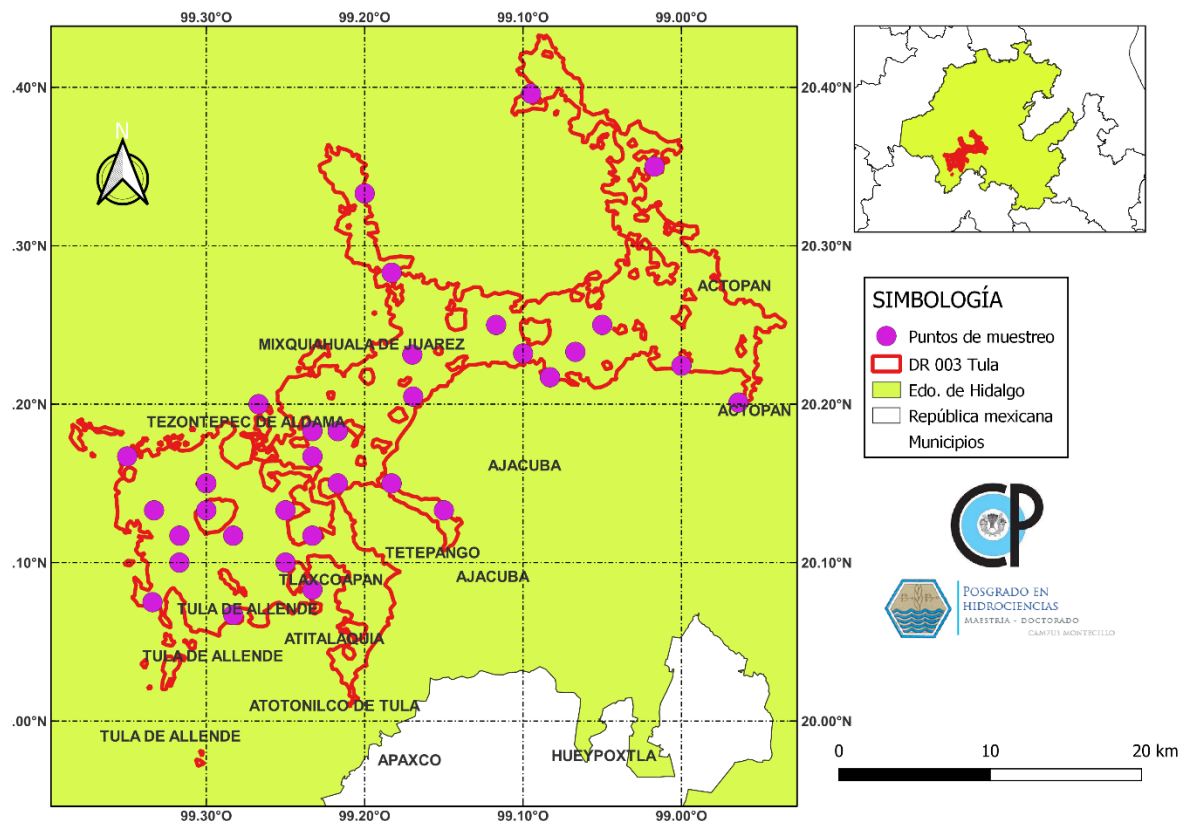


Figura IV.2. Localización de los puntos de muestreo en el DR-003 Tula.

Los análisis de cada una de las muestras de suelo y tejido vegetal colectadas en las parcelas del DR-003 Tula, se efectuaron en el Laboratorio de Ciencias Ambientales del COLMERN, con base a los siguientes métodos:

IV.1. MUESTREO DE SUELO

El muestreo se hizo completamente al azar recorriendo todo el terreno, a una profundidad de 20 cm y un peso de aproximadamente 2.5 kilogramos por cada muestra compuesta.

El procedimiento para coleccionar las muestras de suelo consistió en los siguientes pasos:

- Las herramientas que se emplearon fueron pico y pala recta libres de cualquier contaminante que pudiese ocasionar algún tipo de contaminación como son la presencia de óxidos, residuos de agroquímicos o fertilizantes, materiales orgánicos, suelo de otros terrenos, entre otros aspectos;
- Se retiró el material vegetal y piedras de la superficie, para hacer un hoyo amplio en forma de “v” en el suelo. Se tomó la muestra del fondo del agujero (20 cm);



Figura IV.3. Toma de muestra de suelo.

- El suelo recogido se colocó en una bolsa de plástico grande y limpia para que cupiera la muestra de manera holgada. Esta actividad se consideró como la colecta de una submuestra;
- Se repitió el mismo procedimiento cinco veces en cada parcela seleccionada para coleccionar todas las submuestras, las cuales se colocaron en una sola bolsa, lo cual constituyó la muestra compuesta que sería analizada en el laboratorio.

- ❁ Cada muestra compuesta se identificó con base en las coordenadas del sitio (longitud, latitud y altitud), codificando esta información para facilitar las labores en el campo en la libreta de campo así como en la bolsa correspondiente.
- ❁ Una vez colectadas las muestras de suelo en campo, fueron secadas al aire y a la sombra. Posteriormente se molieron con mazos de madera hasta pasar el material a través de un tamiz de 2 mm de abertura.



Figura IV.4. Secado de muestra de suelo.

IV.1.1. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

IV.1.1.1. *Determinación de pH y CE.*

Esta determinación se realizó en una relación 1:2 o sea 20 g de suelo por 40 de agua. Se utilizó un potenciómetro Orion 5 Start y se calibró con soluciones de pH, 4.0, 7.0 y 10.0, después de haber sido pesado el suelo se le agregó el agua y se dejó reposar durante 30 minutos, agitando de 3 a 4 veces con intervalos de 5 minutos. Finalizado el tiempo de reposo se determinó el pH y la CE.

Este procedimiento se realizó para cada una de las 35 muestras de suelo previamente preparadas.

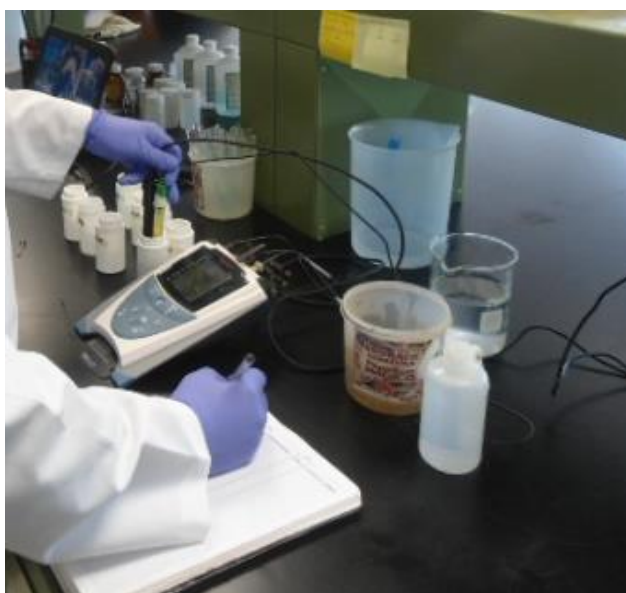


Figura IV.5. Lectura de pH y CE con Potenciómetro Orion 5 Start.

IV.1.1.2. *Determinación de Materia Orgánica*

Se utilizó la metodología de Walkley y Black en la cual se pesa 0.5 g de suelo pasado por un tamiz malla 35 (0.500 mm de abertura), se le agregan 10 ml de $K_2Cr_2O_7$, 20 ml de H_2SO_4 , se deja reposar 20 minutos y se le añaden 200 ml de agua destilada,

posteriormente se le adicionan 5 ml de H_3PO_4 , 5 o 10 gotas de indicador difenilamina y se titula con una solución de FeSO_4 1N, utilizando un titulador automático eppendorf top buret M.



Figura IV.6. Determinación de materia orgánica utilizando titulador automático eppendorf top buret M.

Este procedimiento se realizó para cada una de las 35 muestras de suelo previamente preparadas.

IV.1.1.3. Determinación de Textura

Para la determinación de Textura se utilizó la metodología de Bouyocous, debido a que el contenido de materia orgánica de los suelos de Hidalgo es alto se procedió a eliminar la materia orgánica con el fin de eliminar los agregados de suelo.

Se pesaron 60 g de suelo, se colocaron en un vaso de precipitado de 600 ml, se le adicionaron 40 ml de agua oxigenada lentamente evitando así su proyección, y se colocaron en una plancha dentro de una campana extractora hasta sequedad, es

necesario mantener la cubierta de la campana cubriendo los ojos del técnico debido a la efervescencia y proyección que se presenta.

Una vez terminado el proceso de eliminación de materia orgánica se pesan 50g de suelo, se colocan en vasos de aluminio, se agregó un poco de agua destilada y 100 ml de solución de Hexametáfosfato de sodio, se dejó reposar 15 minutos y posteriormente se agitó durante 5 minutos en la esquimera, terminado esta fase se trasvasó a una probeta de 1000 ml aforando con agua destilada con el hidrómetro introducido hasta su volumen y agitando con un agitador de aluminio durante un minuto, introduciendo de nuevo el hidrómetro y tomando la 1ª lectura a los 40 segundos, dejando reposar 2 horas para tomar la 2ª lectura, cada medición se acompañó de su respectiva lectura de temperatura y en cada bloque de análisis se incluyó su respectivo blanco.



Figura IV.7. Mezcla de muestra con esquimera.



Figura IV.8. Toma de lectura de la muestra con hidrómetro.

Este procedimiento se realizó para cada una de las 35 muestras de suelo previamente preparadas.

IV.1.1.4. Densidad Aparente

Esta determinación se realizó mediante el método de la parafina, el cual consistió en elegir dos terrones de aproximadamente 2 cm de diámetro de las muestras colectadas en las parcelas y se metieron a una estufa a 105 °C, se ataron los terrones con un hilo, se pesaron, después se sumergieron en parafina cubriéndolos totalmente y se volvieron a pesar y finalmente se sumergió el terrón en agua para registrar el volumen de la parafina.

Este procedimiento se realizó para cada una de las 35 muestras de suelo previamente preparadas.

IV.1.1.5. Determinación de S

Para esta determinación se pesaron 10 g de suelo en un matraz de Erlenmeyer de 125 ml, se agregaron 50 ml de fosfato de calcio 0.08 M y se agitó por 30 min, con la ayuda de papel filtro doble, se filtró la solución por gravedad. Se tomó una alícuota de 10 ml de las muestras, se adicionó 2 ml de la solución de sulfato de potasio GR (K_2SO_4), 4 ml de “Gelatin Difco Certified” y se agitó suavemente dejando reposar por 45 min.

Se calibró el espectrofotómetro Cintra 202 a una longitud de onda de 420 nm y se leyó la turbidimetría.



Figura IV.9. Filtrado de solución para determinar S.

Este procedimiento se realizó para cada una de las 35 muestras de suelo previamente preparadas

IV.1.1.6. Determinación de N inorgánico

Para esta determinación se siguió la metodología de micro-Kjeldahl, en la cual se pesó 5 g de suelo y se colocó en un matraz de Erlenmeyer de 125 ml y se agregaron 5 ml de

la solución de KCL 2 N se agitó con acción recíproca regulado a 180 rpm, se decantó y se filtró. Se tomó una alícuota de 10 ml en un matraz, se agregó 0.2 g de MgO calcinado y 0.2 g de aleación de Devarda y se destiló hasta completar 30 ml, se tituló la muestra con ácido sulfúrico 0.005 N hasta el punto del cambio de color de verde a rosa tenue.

Este procedimiento se realizó para cada una de las 35 muestras de suelo previamente preparadas.

IV.1.1.7. *Determinación de B*

Para esta determinación se pesaron 15 g de suelo en un matraz de Erlenmeyer de 125 ml y se agregaron 30 ml de solución extractora de cloruro de calcio 1 M, se dejó hervir durante 5 min y se filtró. Se tomó 2 ml del extracto en un tubo de ensayo, se agregaron 2 ml de la solución amortiguadora y 1 ml de solución de azometina-H, se agitó y se dejó reposar para después tomar la lectura en el fotocolorímetro a 415-420 nm hasta obtener la curva de calibración.

Este procedimiento se realizó para cada una de las 35 muestras de suelo previamente preparadas.

IV.1.1.8. *Determinación de Ca, Mg, Na y K*

En esta determinación se pesó 5 g de suelo en un matraz de Erlenmeyer. Se agregó 25 ml de acetato de amonio 1 M y se agitó por 30 min, se filtró al vacío en balones volumétricos de 100 ml, se lavó el suelo con pequeñas cantidades de la solución de acetato de amonio y se completó a volumen con agua doblemente desionizada. El filtrado se usó para medir las concentraciones de Ca, Mg, Na y K, mediante titulación con HCl 0.01N

Este procedimiento se realizó para cada una de las 35 muestras de suelo previamente preparadas.

IV.1.1.9. Determinación de P

Para esta determinación se siguió la metodología de Olsen, en donde se pesan 2.5 g de suelo, se colocan en tubos de polipropileno de 100 ml de capacidad y se le adicionan 50 ml de la solución extractora Olsen (NaHCO_3 0.5 M pH 8.5), se colocan en una agitador de vaivén a 180 rpm, durante 30 minutos, después se filtra en papel Whatam 42 y se guardan hasta su respectiva análisis en un espectrofotómetro Cintra 202 a una longitud de onda 882 nm.



Figura IV.10. Toma de lectura con Espectrofotómetro Cintra 202 a una longitud de onda 882 nm.

Este procedimiento se realizó para cada una de las 35 muestras de suelo previamente preparadas.

IV.1.1.10. Determinación de metales contaminantes y microelementos (Pb, Cd, As, Cr, Fe, Mn, Zn y Cu)

Para esta determinación se realizó una digestión en un sistema cerrado utilizando un horno de microondas Multiwave PRO Anton-Paar, se pesó 0.1 g de la muestra de suelo, se le agregaron 9 mL de HNO₃ y se introdujo en el rotor a una presión de 5 bars y una temperatura de 180°C, proceso que duró 54 minutos, posteriormente la muestra se trasvasa a un matraz volumétrico de 50 ml, se afora y se filtra para su posterior lectura en un ICP-OES (espectrofotómetro de plasma óptico acoplado inductivamente) modelo HORIBA ULTIMA, manejando diferentes líneas de emisión de longitud de onda, variando los flujos del sheat gas y utilizando curvas de calibración para cada elemento determinado en el equipo, en donde se emplearon soluciones estándares certificados para su preparación.



Figura IV.11. Digestión en un sistema cerrado utilizando un horno de microondas Multiwave PRO Anton-Paar.

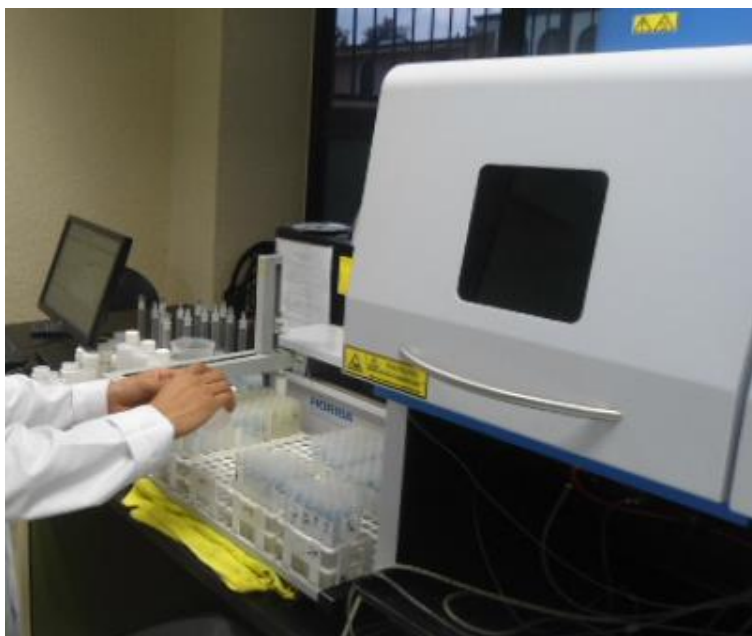


Figura IV.12. Lectura de muestra con espectrofotómetro de plasma óptico modelo HORIBA ULTIMA.

Este procedimiento se realizó para cada una de las 35 muestras de suelo previamente preparadas.

IV.2. MUESTREO DE PLANTA

La organización del muestreo de tejido vegetal se realizó basándose en los mismos criterios que se usaron para la colecta del suelo, se llevó a cabo la recopilación de información disponibles de la región y recorridos de campo previos, de tal manera que para la selección de sitios se identificaron zonas representativas del área de estudio con el propósito de conocer las condiciones actuales, prácticas habituales, y prever condiciones para una buena preservación de muestras. Se eligió el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa*) con base en dos criterios: a) es el cultivo más extendido en el área de estudio; b) El maíz (*Zea mays*) que también es otro cultivo principal del DR, se encontraba en diferentes estados fenológicos, pudiendo alterar los resultados de las variables a evaluar.

Se hizo coincidir en prácticamente todos los casos la selección de los sitios definitivos de colecta del tejido vegetal con los definidos para el muestreo de suelos. El procedimiento para coleccionar el tejido vegetal fue el siguiente:

- ✿ Para cada submuestra de suelo le correspondió una de planta en una superficie equivalente a un cuadrado de 50 cm por lado y con una tijera se cortaron los tallos de la alfalfa al ras del suelo;
- ✿ Cada submuestra se introdujo en la misma bolsa de papel de estraza para formar la muestra compuesta correspondiente a cada parcela seleccionada, en la que se colectó un total de cinco submuestras para obtener una muestra compuesta.



Figura IV.13. Muestreo de biomasa vegetal en el DR-003 Tula.

- ✿ Cada muestra se identificó con base en las coordenadas del sitio (longitud, latitud y altitud), codificando esta información para facilitar las labores en el campo en la libreta de campo así como en la bolsa de papel de estraza correspondiente.
- ✿ La ubicación de cada uno de los sitios seleccionados para la colecta de muestras de material vegetal se presenta en el Cuadro IV.1.

IV.2.1. Preparación de la muestra

La preparación de las muestras de tejido vegetal es crítica para obtener resultados analíticos confiables, por lo tanto, es importante seguir procedimientos adecuados para su descontaminación, secado, molienda y almacenaje.

Una vez que llegaron las muestras al laboratorio, se procedió a limpiar las partículas extrañas de polvo y/o tierra con un cepillo, algunas muestras se lavaron con una solución de detergente no iónico (sin fosfato) posteriormente se enjuagaron con agua destilada (este procedimiento fue rápido sin durar más de 15 segundos, evitando pérdidas de nitrato, boro, potasio y cloruro).

Posteriormente todas las muestras de tejido vegetal se introdujeron en bolsas de papel, manteniendo el orden de la identificación de cada muestra colectada. Las bolsas fueron introducidas en una estufa con aire forzado y se dejaron secar a una temperatura de 70 a 80°C hasta alcanzar un peso constante, el cual se alcanzó en un máximo de 3 días.

Una vez secas, se molieron las muestras con un molino (equipado con tamices de tamaño de poco 1,0 mm y de 0,5 mm) hasta que pase a través de un tamiz de 1,0 mm para los análisis que requieren alícuotas >0.5g y de un tamiz de 0,5 las que requieren una alícuota <0,5 g.

Este procedimiento se realizó para cada una de las 35 muestras de tejido vegetal colectado en campo previamente preparadas.

IV.2.2. Método de calcinación

Se pesaron 3 g de cada muestra de tejido vegetal seca y molida a 1 mm en un crisol y se incluyeron dos crisoles blancos. Se colocaron los crisoles en una mufla y lentamente se subió la temperatura hasta alcanza una temperatura de 500°C (sin rebasar esta temperatura) en dos horas, se dejó calcinar por 8 horas. Se dejó enfriar a temperatura ambiente, se sacaron los crisoles con cuidado evitando disturbar las cenizas y se taparon. Se agregó cuidadosamente 2 ml de agua para humedecer las cenizas y se agregaron 10 ml de ácido clorhídrico 2 mol/l y se hirvieron en una plancha calefactora y se dejó enfriar nuevamente.

El contenido de los crisoles se filtró a través de papel filtro tamaño de poro $\leq 3 \mu\text{m}$ en un matraz aforado de 100 ml, se lavó y enrasó con agua. Se obtuvieron 3 “submuestras”, 2 de los blancos y una proveniente del tejido vegetal.

El filtrado se usó para determinar las concentraciones de: P, As, Cd, Pb y Cr para cada muestra de tejido vegetal colectada en las parcelas del DR 003 Tula.

Este procedimiento se realizó para cada una de las 35 muestras de tejido vegetal colectado en campo previamente preparadas.

IV.2.3. Determinación de P: Calcinación y colorimetría de fosfato-vanadomolibdato.

Para realizar este procedimiento se utilizaron soluciones, las cuales se describen a continuación:

Solución de nitro-vanadomolibdato.

A. Solución de vanadato de amonio, 0,9 g/L.

Se disolvió 0,9 g de NH_4VO_3 en alrededor de 500 ml de agua hirviendo, se enfrió y se agregó 24 ml de HNO_3 69% o 16 ml de HNO_3 100%, se diluyó con agua a 1 L.

B. Solución de molibdato de amonio, 19 g/L.

Se disolvió 19 g de $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ en agua a 50°C , se enfrió y diluyó a 1 L con agua.

C. Ácido nítrico 1,5 mol/L.

Se diluyeron 97 ml de HNO_3 69% (3.4.1) o 62 ml de HNO_3 100% (3.4.2) con agua a 1 L.

Se mezclaron las soluciones A, B y C en partes iguales.

Se elaboró una solución estándar de fósforo, 1000 mg/L de P, donde se pesaron $4,390 \pm 0,001$ g de fosfato dihidrógeno de potasio, KH_2PO_4 , secado a $105^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ durante 2h, en un matraz aforado de 1000 ml, se disolvió y enrasó con agua. Después, se realizó una serie de soluciones estándares de fósforo, en la cual a 7 matraces aforados de 250

ml se agregó 0-5-10-15-20-25-50 ml de la solución estándar de 1000mg/L de P respectivamente, también se agregaron 50 ml de HCl 2 mol/L y agua hasta enrasar. Obteniendo una serie de estándares de 0-20-40-60-80-100-200 mg/L de P.

Para el procedimiento, se tomó una alícuota de 1 ml del filtrado de la submuestra y de los blancos provenientes del método antes descrito (método de calcinación) y de la serie de estándares antes mencionada y se colocaron en recipientes de vidrio, se agregaron 4 ml de la solución de nitro-vanadomolibdato y se mezcló. Se dejó reposar por una hora y se procedió a leer la absorbancia contra agua a 466 nm.

Se dibujó una curva de calibración con las absorbancias y las concentraciones de P de la serie de estándares y se calculó la ecuación de regresión de mejor ajuste ($R^2 > 0,99$). Las concentraciones de P en los filtrados de la muestra y de los blancos, se calcularon por resolución de la ecuación de regresión y se obtuvo el % de P en la muestra según la siguiente fórmula:

$$P (\%) = \frac{(a - b) \times V}{m \times 10.000}$$

donde:

a = mg/L de P en el filtrado de la muestra

b = mg/L promedio de P en los filtrados de los blancos

V = volumen final en mL

m = masa en g de la muestra

Este procedimiento se realizó para cada una de las 35 muestras de tejido vegetal colectado en campo previamente preparadas.

IV.2.4. Determinación de As, Cd, Pb y Cr: por Incineración y espectrofotometría de absorción atómica

Una vez mineralizada 2 g de muestra por incineración. El residuo (cenizas) se disolvió en HCl diluido. La solución se pulverizó en la llama de un aparato de absorción atómica y se midió la absorción o emisión del analito a una longitud de onda específica. Las

cenizas se trataron con 1 ml de ácido clorhídrico 6 N cubrieron totalmente y luego se desecó sobre un plato caliente a una temperatura moderada, luego se agregó 15 ml de ácido clorhídrico 3 N y se siguió calentando el crisol sobre el plato caliente hasta ebullición. Se dejó enfriar y una vez frío se filtró con papel filtro en un matraz volumétrico. El lavado del crisol se realizó con 10 ml de ácido clorhídrico 3N calentándose hasta alcanzar la ebullición, se enfrió y se filtró hacia el matraz y se enrasó con agua. Se prepararon dos bancos tomando las mismas cantidades.

El equipo se calibró usando la solución del blanco de HCK 0,3 N, luego se leyeron las concentraciones para cada estándar y se determinó la curva de calibración del elemento a analizar (As, Cd, Pb y Cr). Seguidamente se leyeron las absorbancias en nm de las muestras para cada elemento: As, Cd, Pb y Cr.

Este procedimiento se realizó para cada una de las 35 muestras de tejido vegetal colectado en campo previamente preparadas.

IV.3. Análisis estadístico

Para la prueba de hipótesis, se realizó una prueba t-student para determinar la diferencia significativa entre las medias, con un nivel de significancia del 95% ($p < 0.05$), se hizo con el programa IBM SPSS Versión 25.0 (IBM Corp., 2017). Mediante estadística deductiva se diferenció el contenido de P en el suelo comparado con la investigación de (Berardo & Marino, 2001) donde indican que con una media de 25 mg/kg de P en suelo, 0.26 % de P en tejido vegetal de acuerdo a los estándares internacionales presentados por (Mills, Benton Jones, & Wolf, 1996). En cuanto a los elementos metálicos en el suelo, se hizo la comparación con el umbral de valores aceptados por la Unión Europea.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En éste capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos en las determinaciones de los parámetros de caracterización física y química del suelo, así como el análisis realizado para las concentraciones de P en suelo y tejido vegetal y elementos metálicos en las 35 muestras colectadas en las parcelas que pertenecen al DR003- Tula.

V.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL SUELO

La caracterización física del suelo se refiere a las características de organización estructural que determinan sus propiedades cualitativas y cuantitativas para el desarrollo de los cultivos (Honorato et al 1988).

Cuadro V.1. Valores de densidad aparente y textura de las muestras de suelos colectadas en el DR-003 Tula.

No. de muestra	Densidad Aparente g/cm ³	TEXTURA			Clase textual
		Arena %	Limo %	Arcilla %	
1	1.22	40	42	18	C
2	1.19	50	28	22	C
3	1.22	42	36	22	C
4	1.22	32	30	38	Cr
5	1.11	36	38	26	Cr
6	1.25	52	28	20	C
7	1.18	29	34	37	Cr
8	1.09	48	34	18	C
9	1.19	34	28	38	Cr
10	1.22	46	34	20	C
11	1.25	20	38	42	R
12	1.28	18	34	48	R
13	1.28	54	26	20	C
14	1.2	37	31	32	Cr
15	1.22	40	38	22	C
16	1.15	33	34	34	Cr
17	1.18	56	24	20	Cra

Cuadro V.2, continuación...

No. de muestra	Densidad Aparente g/cm ³	TEXTURA			Clase textual
		Arena %	Limo %	Arcilla %	
18	1.16	34	24	42	Cr
19	1.11	54	32	14	C
20	1.25	14	26	60	R
21	1.25	30	26	44	Cr
22	1.09	28	36	36	R
23	1.14	43	31	26	Cr
24	1.23	36	30	34	Cr
25	1.11	12	44	44	R
26	1.25	28	38	34	Cr
27	1.23	46	33	21	C
28	1.18	25	34	41	Cr
29	1.25	22	28	50	R
30	1.25	44	30	26	Cr
31	1.19	58	26	16	C
32	1.11	30	30	40	Cr
33	1.19	16	30	54	R
34	1.18	27	34	39	Cr
35	1.25	30	32	38	Cr

La textura es una propiedad que está relacionada con la disponibilidad de nutrientes y retención de agua por el suelo, clasificando en tres categorías de acuerdo a los porcentajes de las diferentes fracciones de suelos, determinadas en la identificación de la clasificación textural y grupo o categoría textural, se consideran como: Arenas (a): partículas entre 0,05 y 2 mm, Limos (L): partículas entre 0,002-0,05 mm, y Arcillas (A): partículas menores que 0,002 mm. (USDA, 2014) o categorías textuales: a) Suelos de texturas gruesas, b) Suelos de texturas medias, y c) Suelos de texturas finas (Gilabert de Brito, Arrieche Luna, León Rodríguez, & López de Rojas, 2015).

Se tienen los porcentajes de 32.5 % de arcilla, 32 % de limo y 35.5 % de arena, la clase textual que predomina en el sitio donde se levantaron las muestras de campo, es la

franco-arcillosa (Cr) seguido francosas (C), Arcillosa (R) y finalmente franco arcillo arenosa (Cra) según la clasificación de la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Esta clasificación corresponde a suelos donde pueden ser desarrollados cultivos como: maíz. Leguminosas, forrajes y hortalizas (Acosta, A., 2007), (López-ritas y López melina 1978).

En cuanto a la densidad aparente (Dap) del suelo, sirve como un indicador de la compactación y de las restricciones al crecimiento de las raíces (USDA, 1999), depende directamente de la textura y materia orgánica. (Aguilar, 1988).

La densidad aparente (Dap) que predomina en las muestras de suelo colectadas en las parcelas que pertenecen al DR03 Tula son valores que van de 1.09 g/cm³ a 1.28 g/cm³. De acuerdo a la clasificación NOM-021-RECNAT-2000, son suelos minerales de tipos arcilloso y Francosos (SEMARNAT, 2002).

Los suelos presentan características físicas favorables permitiendo la aireación y retención del agua en el suelo, debido a que el sistema radical de la alfalfa consiste en una raíz pivotante robusta y muy desarrollada que puede llegar a penetrar hasta 9 metros de profundidad (Alarcón Zúñiga & Cervantes Martínez, 2012), por lo que para tener un buen desarrollo del cultivo es necesario un suelo poroso.

V.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL SUELO

El pH es una de las mediciones más comunes e importantes en los análisis químicos rutinarios de suelo, ya que controla reacciones químicas y biológicas en los suelos (Cepeda Dovala, 1991).

Las muestras presentan valores de pH que van desde 6.8 como mínimo a 8.9 como máximo, de acuerdo a la clasificación de la NOM-021-RECNAT-2000, se encontró que: 51.4% son medianamente alcalino, 42.9% fuertemente alcalino, y tan solo el 5.7% como neutro (SEMARNAT, 2002). Si bien el pH óptimo para el cultivo de la alfalfa sería de 6.5-7.5, puede tolerar de 6.0 a 8.0 pH (Porta, López Acevedo, & Roquero de Laburu, 2003) principalmente por el *Rhizobium*, bacteria nodulante en la alfalfa no se reproduce con

suelo de pH inferior a 5 (Cadena Villegas, 2009). Además, está directamente relacionado con el contenido de bases intercambiables en el suelo (Morón, 2021). Los suelos con pH mayor a 8.0 poseen un exceso de sales o un elevado porcentaje de Na⁺ (Cepeda Dovala, 1991).

Como se ha mencionado, los tipos de clase textural que se presentan en los suelos permiten que también se presenten niveles de materia orgánica con valores de 2.5% a 9.6%. Según la clasificación presentada en la NOM-021-RECNAT-2000, el 37.1% tiene un valor muy alto (> 6.0 %), el 51.4% se clasifica como alto (3.6-6.0%) y el 11.4% presenta un valor medio (1.6-3.5%) (SEMARNAT, 2002). Estos valores pueden deberse al contenido de materia orgánica o/y enmiendas orgánicas que se presentan en el uso de aguas residuales, las cuales son utilizadas en el riego de los alfalfares de la zona, lo que beneficia las funciones más importantes como son: disponibilidad de nutrientes, génesis de estructura, retención de agua, disminución de densidad aparente y resistencia a la penetración, diversidad microbiana, retención y degradación de contaminantes.

Cuadro V.3. Valores de pH, CE y materia orgánica de las muestras de suelos colectadas en el DR-003 Tula.

No. de muestra	pH	CE dS/m	Materia orgánica (%)
1	8.1	3.3	5.1
2	8.9	2.7	7.2
3	8.6	4.5	9.6
4	8.9	5.1	5.5
5	8.7	3.3	5.3
6	8.3	3.6	5.1
7	7.8	2.2	5.3
8	8.6	2.9	7.7
9	8.8	2.8	6.4
10	7.7	0.3	6.9
11	8.4	2.8	2.5

Cuadro V.4, continuación...

No. de muestra	pH	CE dS/m	Materia orgánica (%)
12	8.4	0.6	5.1
13	7.4	2.5	5.7
14	8.7	3.1	4.2
15	7.4	2.0	4.4
16	8.8	4.5	5.4
17	8.8	2.3	7.4
18	8.7	3.1	5.0
19	8.6	3.6	6.7
20	7.6	3.8	4.4
21	8.3	3.0	2.5
22	8.9	6.0	6.7
23	8.4	5.7	6.1
24	8.0	1.0	7.6
25	8.7	3.1	7.1
26	8.7	2.9	8.0
27	7.9	2.8	4.8
28	7.7	2.2	2.5
29	8.1	3.2	3.8
30	8.8	4.0	4.4
31	7.8	1.2	6.3
32	6.9	1.5	2.5
33	7.4	1.2	3.8
34	7.7	2.2	3.9
35	6.8	0.2	5.6

La distinción entre suelos salinos y no salinos se define a través de límites arbitrarios mediante la observación del inicio de la afectación adversa de las plantas cuando el contenido en sales excede del 1%, estableciendo como valor 2 dS/m para establecer el carácter salino desde el punto de vista de la clasificación de los suelos, mientras que 4 dS/m se considera que la salinidad comienza a ser tóxica para las plantas sensibles (INTA, 2007).

De acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 los suelos muestreados en las parcelas que pertenecen al DR03 presentan: 14.3% como suelos salinos (4.1-8.0 dS/m), 62.9 % se clasifica como suelos moderadamente salinos (2.1-4.0 dS/m), 11.4 % como suelos muy ligeramente salino (1.1-2.0 dS/m) y el 11.4% sin efectos de salinidad (<1.0 dS/m), lo que representa que cinco de las 35 muestras recolectadas en campo presentan problemas críticos de sales, atribuibles al empleo de aguas residuales en los suelos de la zona. El alto contenido de sales afectará el crecimiento y desarrollo de las plantas. La alfalfa bajo ciertas condiciones, encuentra favorables condiciones de vida en suelos salinos inapropiados para otros cultivos; aunque cuando es pequeña le puede afectar la salinidad (West Analítica, 2021).

Bases intercambiables

La capacidad de absorción de los agregados órgano-minerales, capaces de retener por acción electrostática diversos contaminantes evitan que se lixivien hacia los mantos freáticos, transformándolos a compuestos disponibles para las plantas.

El proceso reversible por medio del cual las partículas sólidas del suelo adsorben iones de la fase acuosa liberando al mismo tiempo otros iones en cantidades equivalentes es llamado intercambio iónico. Estos iones constituyen la reserva de nutrientes disponibles para las plantas.

La concentración de las bases intercambiables en las muestras de suelo del Distrito de Riego 003 Tula, se muestran a continuación:

Cuadro V.5. Concentración de bases intercambiables en las muestras de suelo colectadas en el DR-003 Tula.

No. de Muestra	Ca	Mg	K	Na	BI
	cmol(+)/kg	cmol(+)/kg	cmol(+)/kg	cmol(+)/kg	cmol(+)/kg
1	50.7	15.5	2.1	1.3	69.7
2	43.6	13.7	2.5	2.1	61.8
3	38.6	22.6	4.2	3.5	69.0
4	46.2	22.5	2.4	3.7	74.8
5	38.2	27.8	2.0	3.2	71.2
6	51.7	15.6	2.1	0.9	70.3
7	26.9	20.2	3.8	1.7	52.6
8	43.6	16.3	3.2	1.2	64.4
9	29.6	21.3	5.0	2.0	57.9
10	41.3	16.1	2.5	1.5	61.3
11	45.7	22.1	1.8	2.2	71.8
12	40.5	23.1	4.7	0.4	68.6
13	32.3	11.5	1.4	0.6	45.9
14	41.6	21.1	2.4	1.3	66.4
15	47.7	18.1	1.7	1.4	68.9
16	43.5	19.6	4.9	2.9	71.0
17	42.5	13.8	1.7	1.2	59.3
18	19.9	19.2	2.2	2.0	43.3
19	43.7	17.9	3.7	1.5	66.8
20	7.1	26.1	4.0	2.5	39.7
21	45.0	20.2	1.8	1.2	68.3
22	45.5	18.1	7.4	4.5	75.6
23	52.2	22.2	2.9	2.8	80.2
24	35.7	19.5	1.4	1.6	58.2
25	25.3	23.4	4.2	2.1	55.0
26	23.4	19.8	3.5	2.1	48.7
27	49.7	16.9	1.9	1.1	69.6

Cuadro V.6, continuación...

No. de Muestra	Ca	Mg	K	Na	BI
	cmol(+)/kg	cmol(+)/kg	cmol(+)/kg	cmol(+)/kg	cmol(+)/kg
28	38.0	21.4	3.0	1.8	64.1
29	48.2	22.7	4.2	1.4	76.4
30	52.7	8.8	8.4	1.1	70.9
31	49.0	9.9	1.4	0.6	60.8
32	30.3	20.6	4.1	1.4	56.4
34	32.4	20.8	3.4	1.8	58.4
35	19.8	18.4	0.4	1.6	40.2

De acuerdo a la de clasificación de la NOM-021-RECNAT-2000, los resultados de los análisis de las bases intercambiables se muestran a continuación:

Para el Ca, el 97% de las muestras una alta concentración, mientras que el 3% se clasifica como media, con un valor mínimo de 7.1 cmol(+)/kg y un valor máximo de 52.7 cmol(+)/kg.

En cuanto al Mg, el 100% de las muestras presentan una alta concentración, con valores mayores de 3.0 cmol(+)/kg, presentando concentraciones de 8.8 cmol(+)/kg a 27.8 cmol(+)/kg.

Finalmente para el K, al igual que el Ca, el 97% de las muestras presentan una concentración alta, mientras que el 3% se clasifica como media, con valores que van desde 0.4 cmol(+)/kg hasta 8.4 cmol(+)/kg.

(Werner, Paulino, Cantarella, Andrade, & Quaggio, 1996), recomiendan 80% de saturación en bases para la implantación y mantenimiento de la alfalfa, sin embargo los valores de bases intercambiables presentes en las muestras de suelo recolectadas en el DR003, Tula presentan valores del 39.7% al 80.2%, ya que este parámetro está

relacionado directamente con el pH, el cual para el cultivo de alfalfa el rango óptimo es de 6.5 - 7.5, entre más aumente el pH, disminuye el contenido de bases intercambiables en la fase líquida del suelo. Así mismo, el pH está relacionado con el contenido de sales en el suelo (Na) como se presentan en la muestra Núm.23 con 8.9 pH (el más alto) y un contenido de 4.5 cmol(+)/kg (el más alto).

Nutrientes en el suelo

La planta absorbe los cationes de la solución del suelo cuya concentración depende de la interacción que se establece entre la fase líquida y los cationes adsorbidos (intercambiables) sobre la superficie de los coloides orgánicos y minerales, donde su disponibilidad es controlada por las interacciones que ocurren entre los diferentes componentes del suelo.

NITRÓGENO

Las formas del nitrógeno en el suelo son de diferente tipo, esto es, como gas en la atmosfera edáfica (N_2) y amoníaco (NH_3), en la solución del suelo como nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-) y amonio (NH_4^+), mientras que en lo compuestos orgánicos se encuentra frecuentemente como grupo amino ($-NH_2$). De todas estas formas nitrogenadas, los iones nitrato y amonio son las que aprovechas los cultivos agrícolas para su nutrición (Grasso & Díaz Zorita, 2020).

Cuadro V.7. Concentración de nitrógeno orgánico en las muestras de suelo colectadas en el DR-003 Tula.

No. de muestra	N- NH_4^+	N- NO_3^-
	mg/kg	mg/kg
1	0	27
2	5	16
3	7	63
4	9	10

Cuadro V.8, continuación...

No. de muestra	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻
	mg/kg	mg/kg
5	0	19
6	3	21
7	2	18
8	6	49
9	2	23
10	0	37
11	2	17
12	1	13
13	2	17
14	2	27
15	0	64
16	12	35
17	14	3
18	2	14
19	0	49
20	3	31
21	1	14
22	21	44
23	10	38
24	3	27
25	3	23
26	3	17
27	1	42
28	1	18
29	2	24
30	1	27
31	2	24

Cuadro V.9, continuación...

No. de muestra	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻
	mg/kg	mg/kg
32	0	20
33	2	13
34	2	18
35	4	14

A pesar de la baja concentración de nitrógeno encontrada en algunos de los terrenos estudiados (<30 mg/kg), la cantidad de este nutriente aportada a través del agua de riego es suficiente para satisfacer la demanda del cultivo del alfalfa, gracias a que posee la característica de fijar nitrógeno del aire mediante un proceso simbiótico entre la raíz de la planta y las bacterias nitrificantes del género *Rhizobium* (INTA, 2007).

Las plantas toman el potasio como ión K⁺. Puede ser que tomen el potasio que está adsorbido (potasio intercambiable) o el que se encuentra disuelto en la solución del suelo. El calcio se aprovecha como Ca²⁺, el cual suele ser muy abundante en la mayoría de los suelos a menos que sea muy arenoso. El magnesio (Mg²⁺) suele ser deficiente en suelos muy arenosos o de un valor bajo en capacidad de intercambio catiónico. La disponibilidad de micronutrientes es dependiente del pH del suelo y del contenido de materia orgánica.

Cuadro V.10. Concentración de Potasio, calcio, magnesio, azufre, hierro, boro, manganeso, zinc y cobre en las muestras de suelo colectadas en el DR-003 Tula.

No. de muestra	S	B	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
1	22.0	3.4	830.0	10153.0	1889.0	17.6	17.0	8.5	26.0
2	80.0	2.8	970.0	8743.0	1661.0	10.7	1.0	8.3	6.3

Cuadro V.11, continuación...

No. de muestra	S	B	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
3	184.0	7.6	1660.0	7739.0	2750.0	28.5	19.1	17.3	74.3
4	49.0	5.9	926.0	9266.0	2733.0	3.1	1.5	5.2	5.0
5	42.0	4.1	796.0	7653.0	3381.0	5.5	1.6	6.8	28.9
6	8.0	2.2	830.0	10351.0	1900.0	7.6	4.3	9.7	13.4
7	69.0	4.3	1481.0	5385.0	2456.0	29.9	11.8	23.6	45.0
8	64.0	4.3	1260.0	8742.0	1984.0	8.3	6.4	9.8	32.8
9	47.0	4.0	1960.0	5930.0	2590.0	6.4	5.6	15.5	19.2
10	9.0	3.9	986.0	8270.0	1956.0	7.7	6.1	24.7	24.4
11	14.0	3.2	706.0	9150.0	2690.0	13.7	6.4	10.8	13.3
12	10.0	4.9	1820.0	8116.0	2802.0	2.3	9.5	6.2	6.8
13	8.0	2.5	546.0	6477.0	1399.0	38.4	16.9	13.4	45.3
14	27.0	3.9	931.0	8327.0	2568.0	7.8	5.6	15.3	21.0
15	20.0	3.7	680.0	9550.0	2199.0	16.9	10.1	10.6	28.0
16	33.0	3.1	1916.0	8725.0	2387.0	4.8	3.0	11.3	11.3
17	65.0	3.0	671.0	8520.0	1681.0	4.8	1.4	6.9	6.4
18	67.0	7.9	866.0	3993.0	2334.0	13.0	2.9	21.5	11.8
19	57.0	5.0	1460.0	8765.0	2171.0	9.7	5.5	14.1	34.3
20	13.0	4.0	1578.0	1413.0	3168.0	10.1	5.0	23.9	10.9
21	8.0	2.9	722.0	9016.0	2461.0	7.9	3.6	12.2	7.5
22	39.0	2.4	2900.0	9124.0	2205.0	1.7	0.4	7.3	1.6
23	25.0	2.3	1120.0	10470.0	2701.0	12.3	3.6	6.5	11.6
24	10.0	5.1	564.0	7154.0	2365.0	10.7	14.5	20.7	28.0
25	84.0	4.6	1640.0	5068.0	2849.0	23.3	11.7	17.4	42.8
26	127.0	5.2	1360.0	4692.0	2404.0	51.1	19.2	23.9	80.7
27	14.0	3.0	755.0	9951.0	2050.0	12.2	7.2	10.2	20.7
28	12.0	3.3	1154.0	7614.0	2599.0	11.2	5.4	17.1	11.3
29	11.0	2.8	1623.0	9652.0	2755.0	3.5	2.4	9.3	5.1

Cuadro V.12, continuación...

No. de muestra	S	B	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
30	8.0	1.9	3280.0	10553.0	1072.0	2.6	0.3	8.7	1.5
31	6.0	2.3	540.0	9817.0	1198.0	22.9	6.8	5.8	21.5
32	11.0	3.4	1602.0	6078.0	2509.0	8.8	4.3	23.3	9.3
33	15.0	2.8	982.0	7013.0	2451.0	9.5	2.1	26.4	4.1
34	41.0	3.8	1318.0	6499.0	2528.0	20.6	8.6	20.3	28.1
35	12.0	4.0	156.0	3962.0	2234.0	9.2	34.3	17.3	24.2

En la interacción suelo-planta-atmósfera todo está relacionado entre sí. Existen factores que influyen grandemente en la absorción de los elementos nutrientes en la planta. La textura que se presenta en estos suelo, el tamaño de partícula permite que exista una mayor interacción en la asimilación de nutrientes, gracias a la porosidad que existe en el suelo, sobre todo para el cultivo de alfalfa, ya que debido a su sistema radicular, la raíz necesita de oxígeno con ello la capacidad de desarrollarse y absorber nutrientes.

A cierto valor de pH, los micronutrientes pueden formar compuestos inorgánicos no solubles y, por lo mismo, no estar disponibles para el cultivo. La materia orgánica contribuye a reducir estos problemas porque si la concentración del micronutriente es muy baja, el material orgánico lo aporta y resuelve la condición de déficit.

Las concentraciones de los nutrientes que se han cuantificado, se debe principalmente al riego con aguas residuales en las parcelas agrícolas, y mientras sigan utilizándose esta fuente de agua de riego, además de tener una fuente de agua, también sirve como fertilizante para los cultivos, sin dejar de lado que también existen otros elementos que pueden perjudicar al suelo y posteriormente entrar a la cadena trófica afectando directamente al humano.

V.3. Fósforo en suelo y tejido vegetal

El fósforo es absorbido por el cultivo en distintas formas aniónicas, cuyo predominio depende del pH del suelo por lo que en la región predomina la forma HPO_4^{2-} . La reacción del fósforo en suelos neutros y alcalinos se lleva a cabo en minerales de calcio formando compuestos de fosfato de calcio insolubles. Este nutriente prácticamente no se mueve, queda disponible sólo en el sitio donde quedó después de haber sido agregado ya sea a través del riego o por la adición de algún insumo.

Sin lugar a dudas el P es un macronutriente que tiene alto impacto en la productividad, calidad y persistencia en la alfalfa. Existen diversos estudios de respuesta en donde se agrega fertilizante fosfatado y se han visto importantes incrementos de alfalfa (Morón, 2021).

El análisis elemental nos ayuda a determinar la naturaleza y las proporciones en que se encuentra el fósforo en el suelo y que tanto puede ser absorbido por la planta a través de los tejidos vegetales.

Cuadro V.13. Concentraciones de fósforo en las muestras de suelo y tejido vegetal colectadas en las parcelas del DR-003 Tula.

No. de muestra	Fósforo	
	Suelo	Tejido vegetal
	mg/kg	%
1	86.0	0.55
2	80.0	0.29
3	184.0	0.25
4	49.0	0.28
5	42.0	0.56
6	36.0	0.42
7	89.0	0.30
8	64.0	0.37
9	47.0	0.34
10	68.0	0.64

Cuadro V.14, continuación...

No. de Muestra	Fósforo	
	Suelo	Tejido vegetal
	mg/kg	%
11	52.0	0.23
12	36.0	0.45
13	72.0	0.41
14	63.0	0.46
15	72.0	0.34
16	51.0	0.39
17	65.0	0.26
18	67.0	0.45
19	57.0	0.37
20	58.0	0.79
21	32.0	0.46
22	39.0	0.27
23	52.0	0.43
24	106.0	0.37
25	84.0	0.41
26	127.0	0.31
27	54.0	0.38
28	52.0	0.40
29	49.0	0.23
30	33.0	0.46
31	56.0	0.36
32	51.0	0.28
33	48.0	0.24
34	70.0	0.33
35	58.0	0.25

De acuerdo al estudio realizado por (Berardo & Marino, 2001), en donde evaluó el efecto de la fertilización fosfatada en la alfalfa mediante los cambios en los niveles de fósforo extraíble y su relación con la producción de forraje, encontró que el suelo necesita 25 mg/kg de P para el cultivo de alfalfa. De acuerdo al análisis estadístico el contenido de fósforo en el suelo (P-s) del presente estudio supera a la concentración reportada por Berardo & Marino (2001). Bien se sabe que aunque exista un nutriente en el suelo no significa que esté disponible para la planta, existen varios factores para que pueda absorberlo a través del sistema radicular. En el caso de esta investigación la concentración de P en la biomasa vegetal (P-tv) se presenta de 0.23% a 0.79% lo cual de acuerdo a lo reportado por (Mills,Benton Jones, & Wolf, 1996) , es un rango óptimo para el desarrollo del cultivo de alfalfa.

Cuadro V.15. Análisis estadístico para la concentración de P en suelo y tejido vegetal en las muestras colectadas en el DR-003 Tula.

Variable	N	Media	Desv. Est.	Desv. Error promedio	t	gl	Sig. (bilateral)	Dif. De medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
									Inferior	Superior
P-s	35	64.3	29.1	4.9	7.98	34	.0	39.3	29.3	49.3
P-tv	35	0.4	0.1	0.02	5.87	34	.0	0.1	0.07	0.2

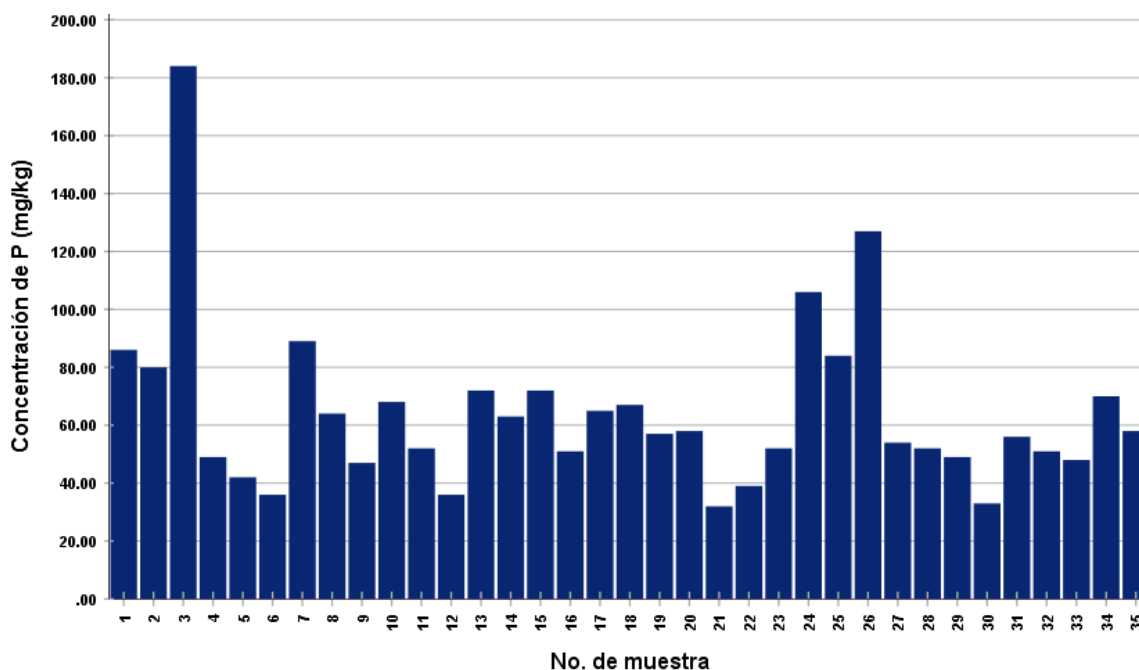


Figura V.1. Concentraciones de fósforo en las muestras de suelo colectadas en el DR-003 Tula.

Las concentraciones de P en el suelo que se cuantificaron en los análisis presentan un rango de 32 mg/kg hasta 184 mg/kg, la muestra núm.3 presentó el valor más elevado de P con: 7 mg/kg N-NH₄⁺, 63 mg/kg de NNO₃⁻, un pH de 8.6, un CE de 4.5 dS/m, 9.6 % de materia orgánica y una D_{ap} 1.22 g/cm³; seguida de la muestra núm.26 con un valor de 127 mg/kg de P con: 3 mg/kg N-NH₄⁺, 17 mg/kg de NNO₃⁻, un pH de 8.7, un CE de 3 dS/m, 2.5 % de materia orgánica, una D_{ap} 1.25 g/cm³.

Mientras que la muestra núm.21 presentó la concentración más baja con: 1 mg/kg N-NH₄⁺, 14 mg/kg de NNO₃⁻, un pH de 8.3, un CE de 3dS/m, 2.5% de materia orgánica y una D_{ap} 1.25 g/cm³; seguida la muestra núm.30 con 33 mg/kg con: 1 mg/kg N-NH₄⁺, 27 mg/kg de NNO₃⁻, un pH de 8.8, un CE de 4 dS/m, 4.4 % de materia orgánica y una D_{ap} 1.25 g/cm³.

Se puede apreciar que el contenido de N inorgánico y la materia orgánica pueden estar relacionados con la concentración de P en el suelo.

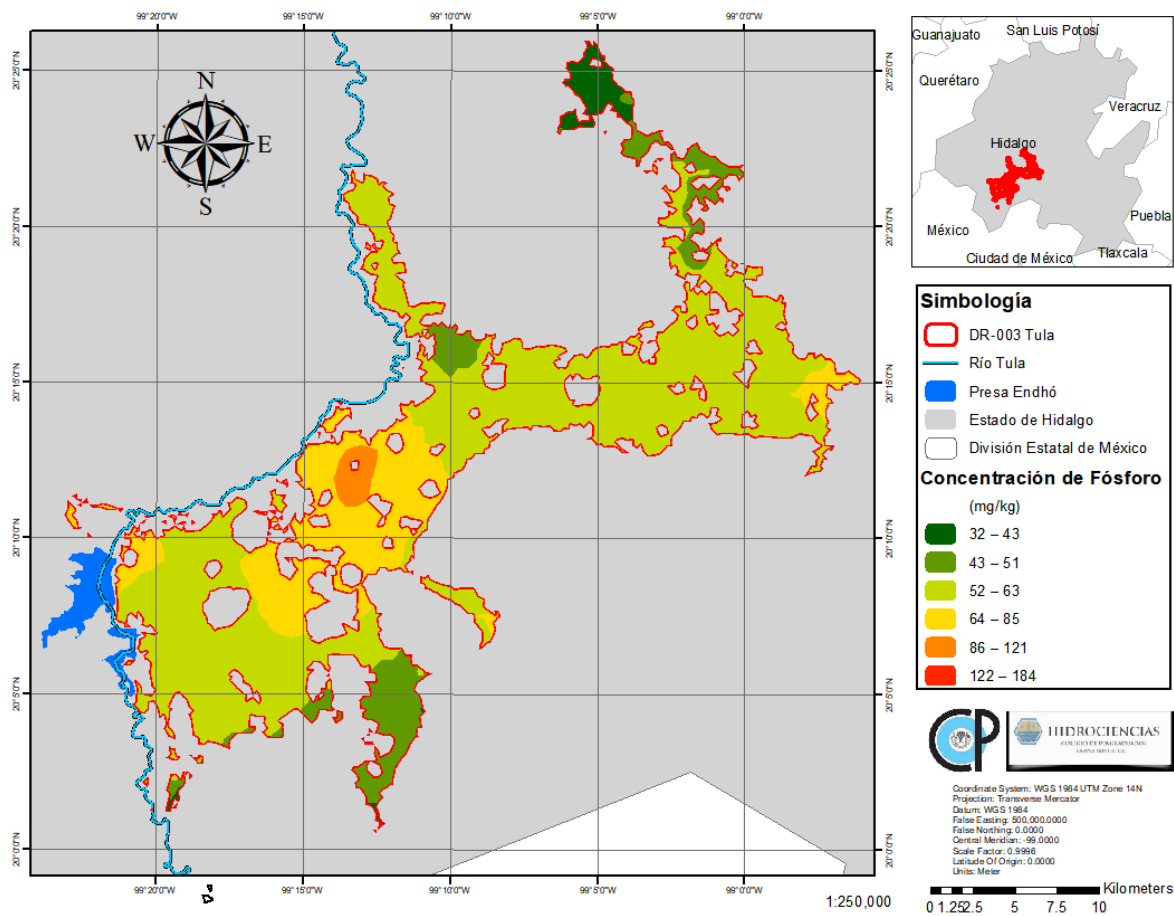


Figura V.2. Mapa de distribución de fósforo (P) en el DR-003 Tula.

La cantidad de fósforo que tienen en los suelos del Distrito de Riego 003 Tula, presentan valores que van de 80 kg/ha hasta 448.96 kg/ha de P.

Lo que corresponde a los resultados en el análisis de tejido vegetal en planta de alfalfa, se tuvieron concentraciones de 0.23% a 0.79 %. La muestra núm.20 con la concentración más alta con 0.79% de P en la biomasa vegetal, presenta también: 3 mg/kg N-NH₄⁺, 31 mg/kg de NNO₃⁻, un pH de 7.6, un CE de 3.8 dS/m, 4.4% de materia orgánica y una D_{ap} 1.25 g/cm³, la muestra núm.29 presentó la concentración más baja con 0.23% de P en la biomasa vegetal: 2 mg/kg N-NH₄⁺, 24 mg/kg de NNO₃⁻, un pH de 8.1, un CE de 3.8 dS/m, 3.8% de materia orgánica y una D_{ap} 1.25 g/cm³, aquí también se puede apreciar

que el pH y el contenido de N inorgánico está relacionado con el contenido de P que se absorbió en el tejido vegetal.

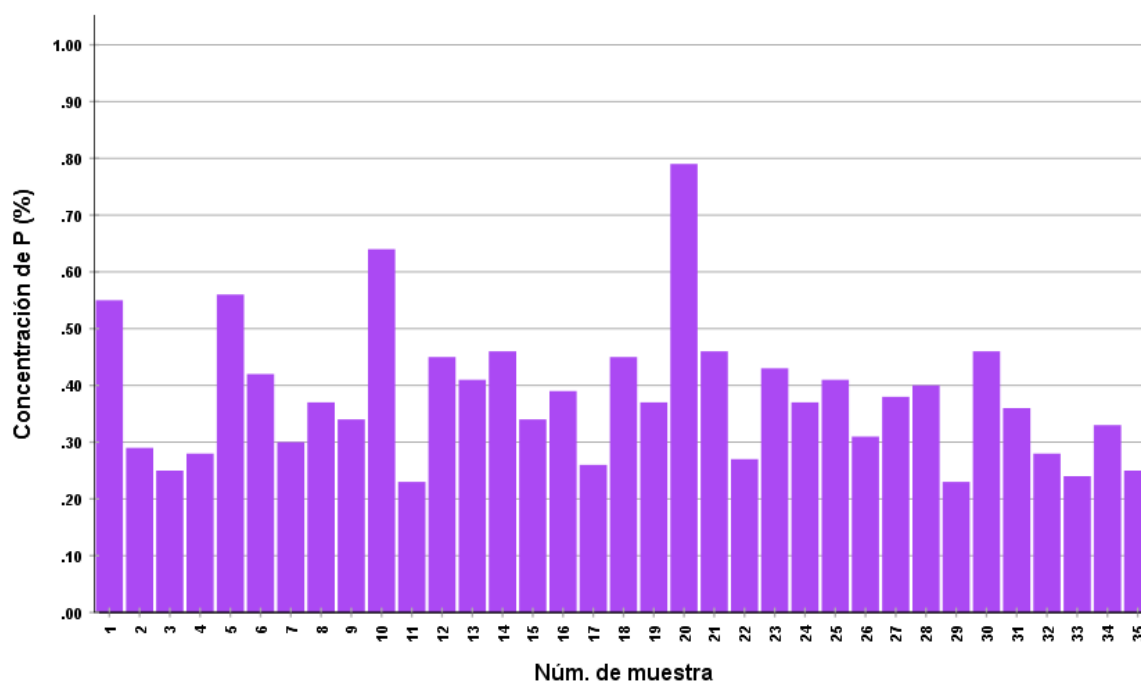


Figura V.3. Concentraciones de P en las muestras de tejido vegetal colectadas en el DR-003 Tula.

V.4. Elementos contaminantes en Suelo y Tejido Vegetal

Estos elementos son compuestos que provienen de diversas fuentes, en el caso de esta investigación, la fuente proviene de actividades antropogénicas que tiene su origen en el uso de aguas residuales empleadas para el riego de las parcelas agrícolas del Distrito de Riego 03 Tula.

Hay elementos que en ciertas cantidades son esenciales para la nutrición de plantas como es el caso del nitrógeno, fósforo y oligoelementos (hierro, zinc, cobre, manganeso, molibdeno y boro). Lo mismo ocurre para el caso de animales y el ser humano (selenio, cromo y níquel) pero si rebasan ciertos límites causan toxicidad al organismo sin importar que se trate de plantas, animales o seres humanos. Otros elementos como cadmio, mercurio, plomo y arsénico no se les conoce alguna función biológica pero pueden llegar a provocar daños severos a la salud.

Cuadro V.16. Concentraciones de Cadmio, Plomo, Cromo y Arsénico en las muestras de suelo y tejido vegetal colectadas en las parcelas del DR-003 Tula.

No. de muestra	Suelo				Tejido vegetal			
	Cd mg/kg	Pb mg/kg	Cr mg/kg	As mg/kg	Cd mg/Kg	Pb mg/Kg	Cr mg/Kg	As mg/Kg
1	1.0	12.8	0.1	0.0	1.4	0.0	2.0	0.0
2	0.0	1.5	0.0	0.0	3.3	0.0	3.4	0.0
3	1.3	12.2	0.0	0.0	0.6	0.0	2.0	0.0
4	0.0	4.3	0.0	0.0	1.0	0.0	2.0	0.0
5	1.0	6.5	0.0	0.0	2.3	0.0	4.5	0.0
6	0.5	5.9	0.0	0.0	0.0	3.9	2.0	0.0
7	0.9	9.4	0.0	0.0	7.0	0.0	2.0	0.0
8	0.8	6.5	0.0	0.0	3.1	0.0	2.0	0.0
9	0.7	6.6	0.0	0.0	6.4	0.0	1.5	0.0
10	0.9	4.5	6.2	0.0	1.2	1.7	1.6	0.0
11	0.1	4.3	0.0	0.0	1.4	0.0	7.4	0.0
12	0.5	0.9	3.5	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0

Cuadro V.17, continuación...

No. de muestra	Suelo				Tejido vegetal			
	Cd	Pb	Cr	As	Cd	Pb	Cr	As
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg
13	1.1	9.4	0.1	0.0	0.0	0.0	3.1	0.0
14	0.8	6.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0
15	0.7	7.2	0.0	0.0	0.2	0.0	4.4	0.0
16	0.4	3.9	0.0	0.0	1.5	0.0	2.2	0.0
17	0.0	2.5	0.0	0.0	0.1	1.7	1.5	0.0
18	0.3	4.8	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0
19	0.7	5.7	0.0	0.0	0.5	0.0	2.8	0.0
20	0.4	10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0
21	0.4	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0
22	0.0	1.8	0.0	0.0	4.0	0.0	5.0	0.0
23	0.4	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
24	1.3	4.6	10.1	0.0	0.0	0.0	3.2	0.0
25	1.0	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
26	1.4	11.9	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0
27	0.6	6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0
28	0.2	5.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0
29	0.3	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0
30	0.1	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
31	0.4	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0
32	0.4	6.9	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	0.0
33	0.2	4.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0
34	0.6	7.5	0.0	0.0	0.7	0.0	1.8	0.0
35	1.1	4.8	10.7	0.0	0.2	0.0	2.3	0.0

Este tipo de estudios aún falta por ser desarrollados en México, pero a nivel internacional existen niveles de referencia para evaluar las condiciones que prevalecen en un sitio dado. Con base en lo anterior y tomando como referencia los umbrales establecidos en la Unión Europea, fundamentalmente por lo reportado en Holanda respecto al nivel que indica que por encima del cual hay contaminación demostrable, se evaluó la concentración de los elementos contaminantes analizados en las muestras de suelo colectadas en el área de estudio.

Cuadro V.18. Umbral que denota contaminación por cromo (Cr), arsénico (As), cadmio (Cd) y plomo (Pb) y su contraste con el resultado de las muestras de suelo colectadas en el Distrito de Riego 003, Tula.

Elemento	Holanda	España	Promedios mundiales en suelos	Presente estudio
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Cr**	100	66	10-84	0-10.7
Co	20	--	--	N.C.
Ni	50	31	4-55	N.C.
Cu	36	34	6-80	N.C.
Zn	200	109	17-125	N.C.
As**	20	--	20-50	0
Mo	10	--	--	N.C.
Cd**	0.80	.84	0.06-1.1	0-1.4
Sn	20	--	--	N.C.
Ba	200	--	--	N.C.
Hg	0.5	1	--	N.C.
Pb**	85	88	10-84	0.5-12.8
Referencias	Lista Holandesa de Valores Brus et al., (2009)	Pérez et al.,(2000), Castillo Carrión, et al.,(2002)	McBride, (1994)	Presente estudio

** Elementos evaluados en la investigación

N.C.: No Cuantificado

Fuente: citado por (Rueda Saa, Rodríguez Victoria, & Madriñan Molina, 2011).

Las concentraciones de Pb, Cr y As que se presentaron en los análisis de suelo en las muestras colectadas, están por debajo de los límites establecidos por la Unión Europea reportada por Holanda, mientras que el Cd se encuentra por encima del umbral reportado por Holanda, España y el promedio mundial.

La muestra núm.26 presenta la concentración más elevada de Cd con un valor de 1.4 mg/kg, con un pH de 8.7, 2.9 % de materia orgánica, 40% arena, 42% de limo y 18 % de arcilla, y la muestra núm.22 presenta 0 mg/kg de Cr siendo la única muestra que no presentó niveles de Cr, con un pH de 8.9, 6% de materia orgánica, 28% arena, 36% de limo y 36 % de arcilla.

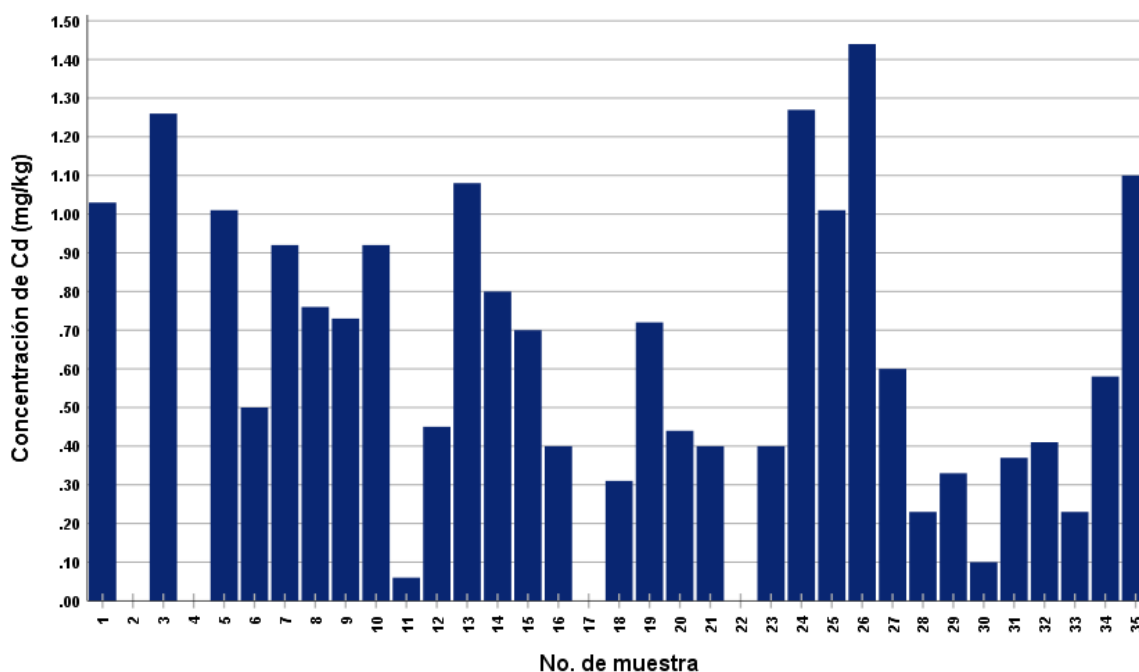


Figura V.4. Concentraciones de Cd en las muestras de suelo colectadas en el DR-003 Tula.

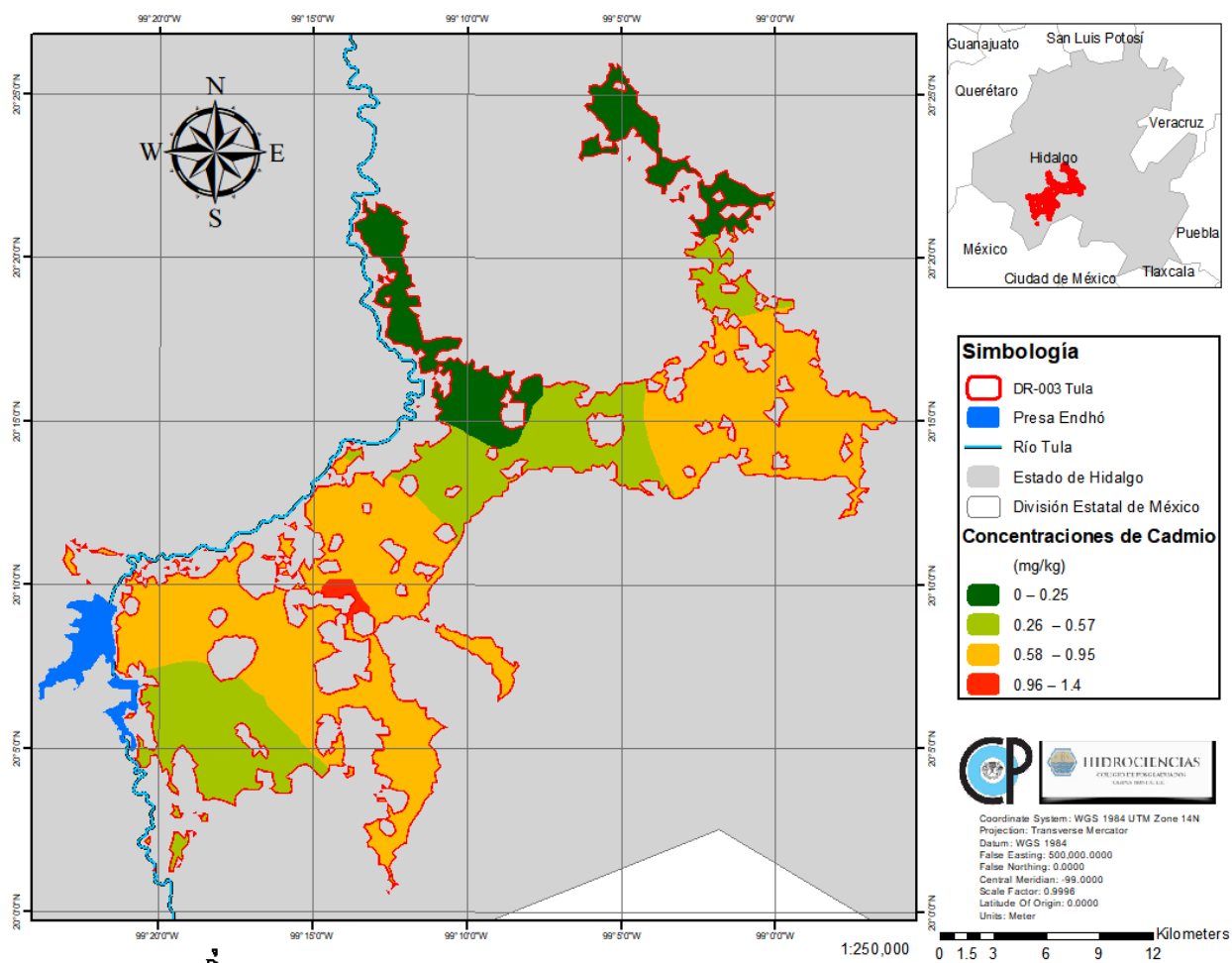


Figura V.5. Mapa de distribución de Cadmio (Cd) en el DR-003 Tula.

Los suelos del Distrito de Riego 003 Tula presentan concentraciones de cadmio que van desde 0.0 kg/ha hasta valores de 3.6 kg/ha.

Lo que corresponde el Pb, la concentración más elevada se presentó en la muestra núm.1 con una concentración de 12.8 mg/kg con un pH de 8.1, 5.1 % de materia orgánica, 40% arena, 42% de limo y 18 % de arcilla, la muestra núm.30 presenta un valor de 0.5 mg/kg siendo la más baja con un pH de 8.8, 4.4% de materia orgánica, 44% arena, 0% de limo y 26 % de arcilla.

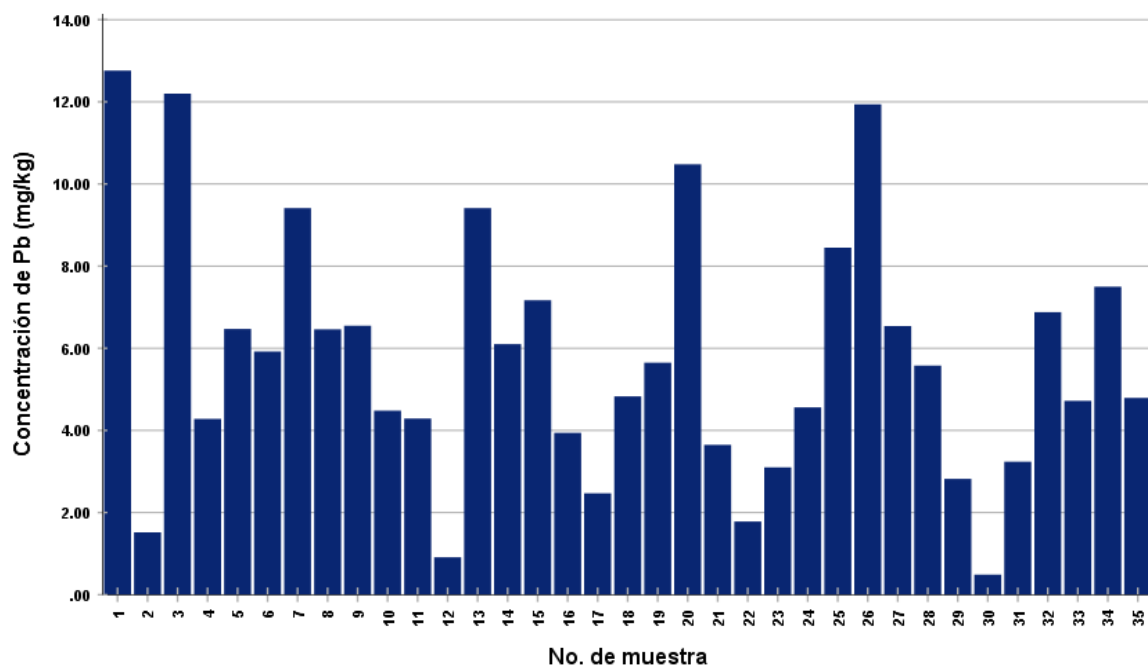


Figura V.6. Concentraciones de Pb en las muestras de suelo colectadas en el DR-003 Tula.

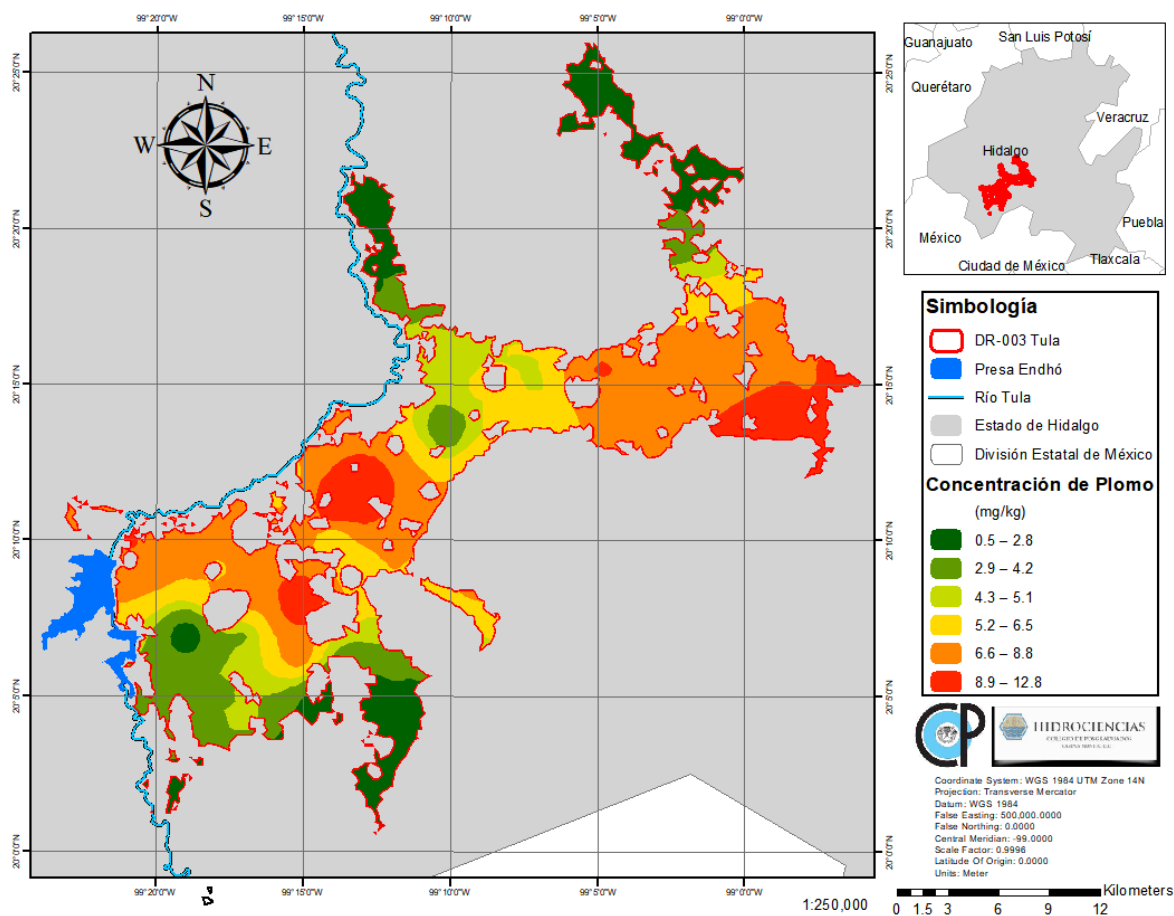


Figura V.7. Mapa de distribución de Plomo (Pb) en el DR-003 Tula.

Las concentraciones de plomo que se encontraron en los suelos del Distrito de Riego 003 Tula presentan valores que van desde 1.2 kg/ha hasta 31.1 kg/ha de Pb.

Mientras que para el Cr, la muestra núm.35 es la más elevada, con 10.7 mg/kg con un pH de 6.8, 5.6 % de materia orgánica, 30% arena, 32% de limo y 38 % de arcilla.

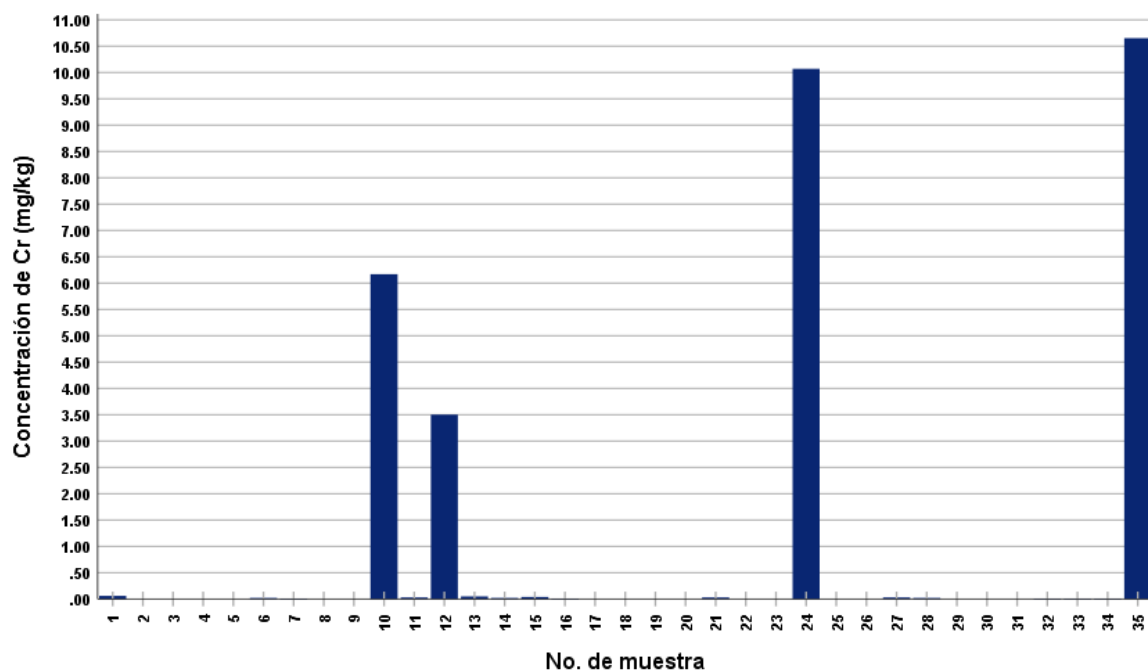


Figura V.8. Concentraciones de Cr en las muestras de suelo colectadas en el DR-003 Tula.

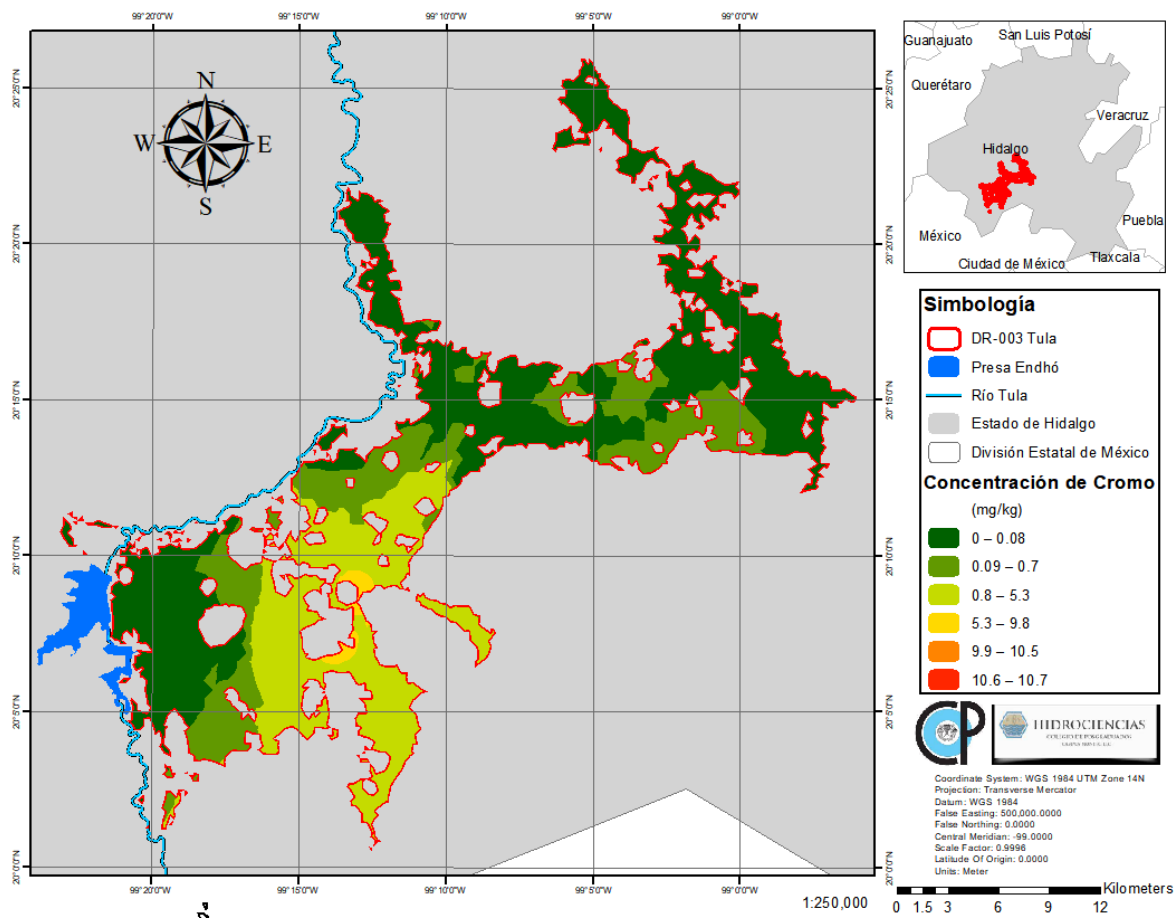


Figura V.9. Mapa de distribución de Cromo (Cr) en el DR-003 Tula.

En cuanto la cantidad de cromo que se puede encontrar en los suelos del Distrito de Riego 003 Tula, se tienen valores desde 0 kg/ha hasta 26.6 kg/ha de Cr.

Para la absorción de Cd, Pb, Cr y As en tejido vegetal, se hará la comparación con los estudios realizados en el Distrito de Riego 003 Tula, Hidalgo, México por (Vázquez Alarcón, Justin Cajuste, Siebe Grabach, Alcántar González, & De las Isla de Bauer, 2001), (Siebe, 1994) (Carrillo G. & Cajuste J., 1995) como se muestran en la siguiente tabla:

Cuadro V.19. Comparación de concentraciones de Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Cromo (Cr) y Arsénico (As) en tejido vegetal respecto a otros autores.

Cadmio (Cd) mg/kg	Plomo (Pb) mg/kg	Cromo (Cr) mg/kg	Arsénico (As) mg/kg	Referencia
0.05 - 2.0	0.2 - 0.35	28-111	NC	Siebe (1994)
1.0 - 8.0	8.0 - 19.0	NC	NC	Carrillo G. & Cajuste J. (1995)
0.7 - 2.3	1.2 - 5.7	NC	NC	Vázquez Alarcón et al. (2001)
0.0 7.0	0 - 3.9	0.5 - 7.4	0	Presente estudio

N.C.: No Cuantificado

El establecimiento de niveles estándar de elementos contaminantes para la valoración de la contaminación del suelo, constituye el principal requisito de calidad y protección de las funciones agrícolas (Kabata-Pendias & Pendias, 1984).

El análisis estadístico para ambas variables (s y tv) de muestra que el P-valor es menor que $\alpha=0.05$ lo cual indica que la media se encuentran por debajo de los límites establecidos para elementos metálicos.

Cuadro V.20. Análisis estadístico para la concentración de Cd, Pb y Cr en suelo y tejido vegetal en las muestras colectadas en el DR-003 Tula.

Variable	N	Media	Desv. Est.	Desv. Error promedio	t	gl	Sig. (bilateral)	Dif. De medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
									Inferior	Superior
Cd-s	35	0.59	0.4	0.06	-3.105	34	.004	-0.21	-0.35	-0.07
Cd-tv	35	0.99	1.76	0.29	-4.365	34	.000	-1.3	-1.91	-0.69
Pb-s	35	5.75	3.11	0.52	-150.58	34	.000	-79.24	-80.31	-78.17
Pb-tv	35	0.20	0.75	0.12	-42.934	34	.000	-5.49	-5.75	-5.23
Cr-s	35	0.87	2.64	0.44	-221.568	34	.000	-99.12	-100.03	-98.21
Cr-tv	35	2.12	1.42	0.24	-452946	34	.000	-108.87	-109.35	-108.38
As-s	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-
As-tv	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-

De las muestras de alfalfa analizadas, 15 presentaron concentraciones de Cadmio acumulado en tejido vegetal, las tres muestras con concentraciones más elevadas fueron: la muestra núm.7 con 7.0 mg/kg, seguida la núm.9 con 6.4 mg/kg y núm.22 con 4 mg/kg.

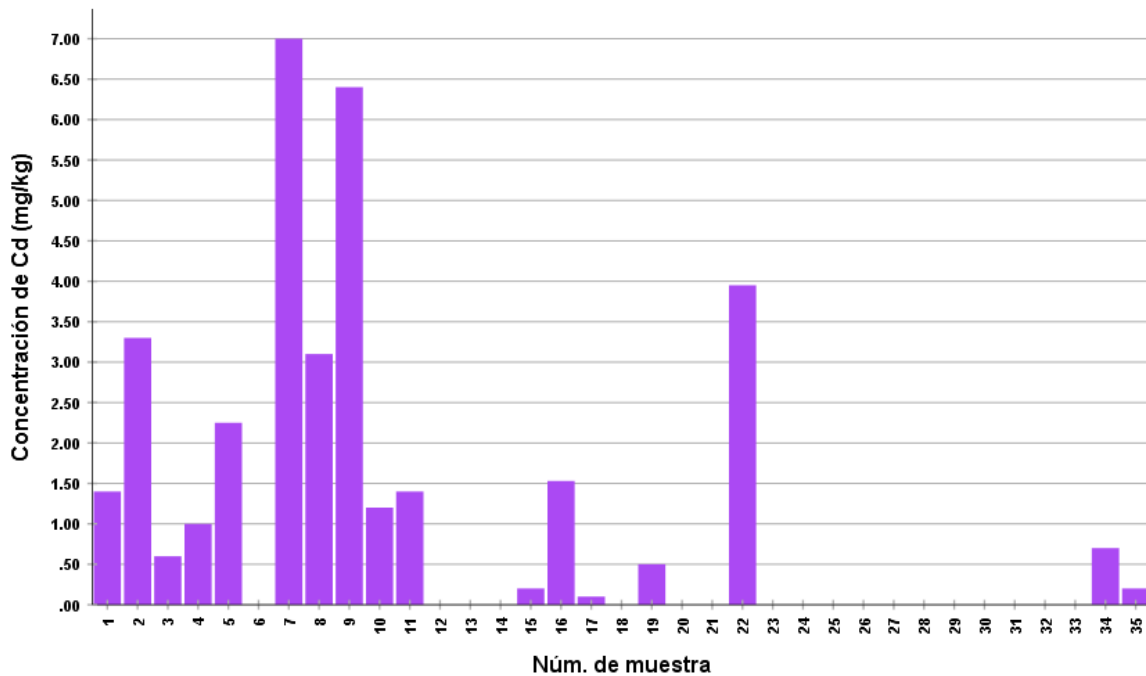


Figura V.10. Concentraciones de Cd en las muestras de tejido vegetal colectadas en el DR-003 Tula.

En cuanto a las concentraciones de Plomo acumulado en la biomasa vegetal en las muestras de alfalfa colectadas en las parcelas de DR 03 Tula, solo 3 presentaron concentraciones, la muestra núm.6 con 3.9 mg/kg de Pb, la núm.10 y la núm.17 con 1.7 mg/kg de Pb.

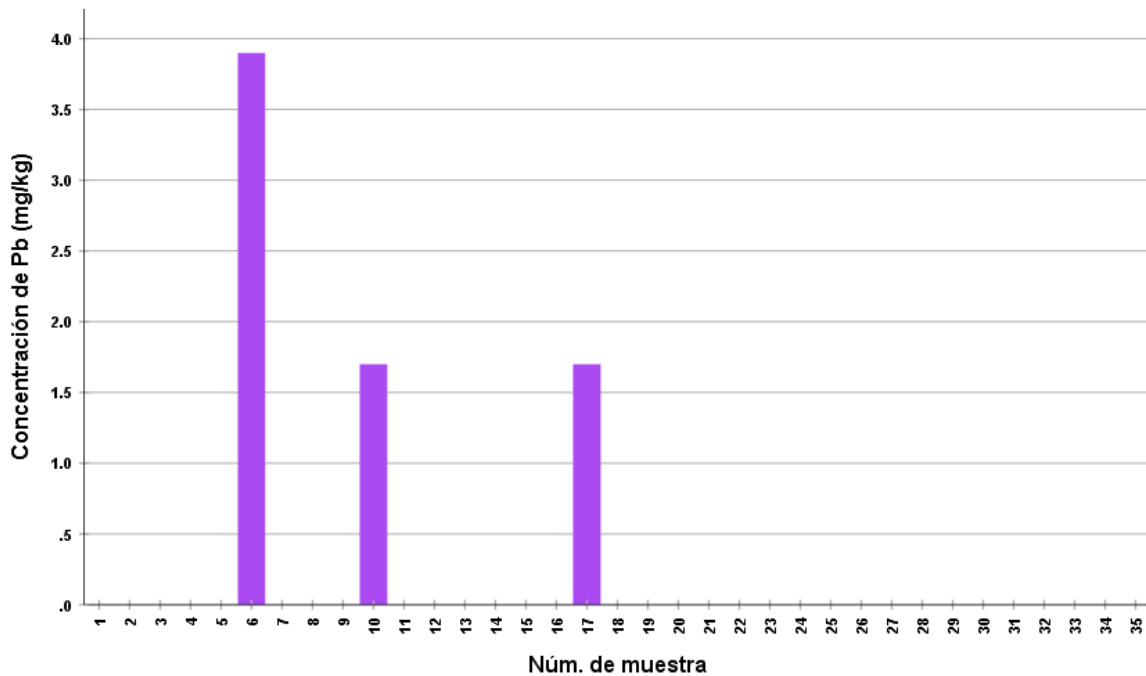


Figura V.11. Concentraciones de Pb en las muestras de tejido vegetal colectadas en el DR-003 Tula.

Los análisis en tejido vegetal presentan que la muestra núm.11 presentó la mayor concentración acumulada con un valor de 7.4 mg/kg de Cr, mientras que la muestra núm.31 presentó el nivel más bajo con 0.5 mg/kg de Cr acumulado en la biomasa vegetal de alfalfa.

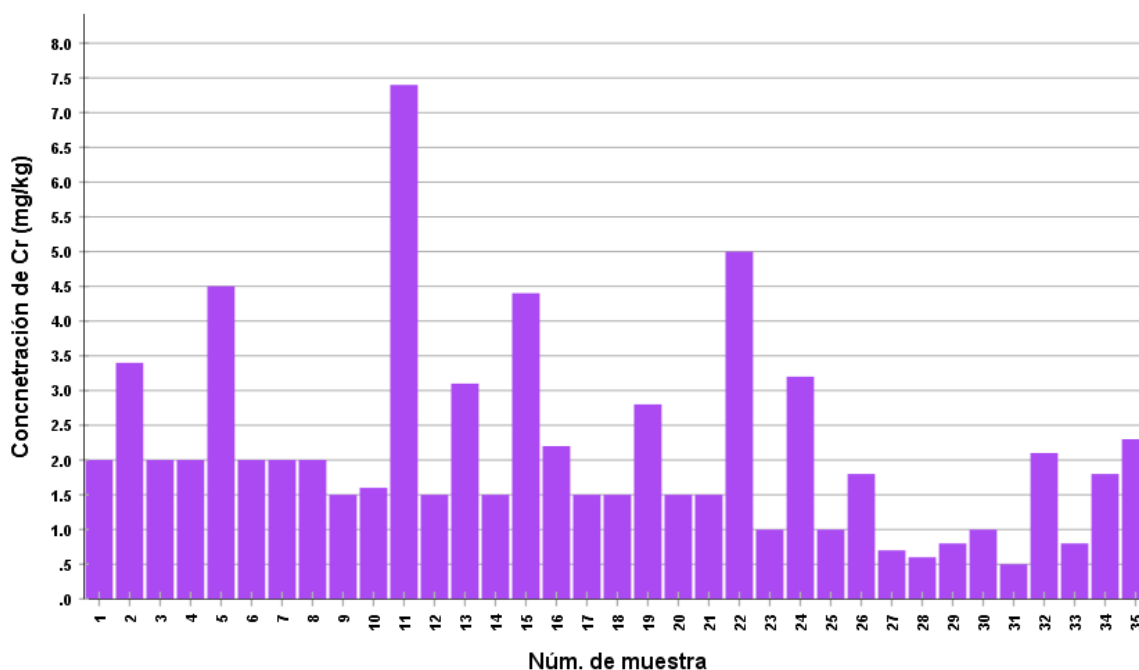


Figura V.12. Concentraciones de Cr en las muestras de tejido vegetal colectadas en el DR-003 Tula.

La moderada absorción de los elementos contaminantes por las plantas concuerda con la alta capacidad filtro y amortiguadora de los suelos de la zona, los cuales muestran pH neutros a alcalinos, contenidos medios a elevados de materia orgánica, texturas limosas.

La movilidad y la disponibilidad de elementos contaminantes están asociadas a las características del suelo, estas son un factor importante al momento de estudiar la contaminación por elementos metálicos (Siebe, 1994), De acuerdo con la caracterización del suelo, se espera que en los suelos con mayor contenido de arcilla se presente menor movilidad, debido a la adsorción del metal en la arcilla; mientras que en los suelos arenosos no se presenta la adsorción, permitiendo mayor movilidad hacia mayores profundidades. El pH es un factor determinante, ya que la mayoría de los metales tienden a estar más disponibles en medio ácido (Ramírez Niño & Navarro Ramírez, 2015).

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los suelos del Distrito de Riego 003 Tula, tienen características: de medianamente alcalinos (pH 7.4 – 8.5) a fuertemente alcalinos (pH >8.5); un grado moderadamente salino (2.1 – 4.0 dS/m), son suelos minerales con alto contenido de materia orgánica (3.6 – 6.0 %), y con clase textural en su mayoría franco-arcillosa (Cr).

Las concentraciones de fósforo (P) analizadas en las muestras de suelo y tejido vegetal colectadas en las parcelas del Distrito de Riego 03 Tula son suficientes para satisfacer la demanda nutrimental de los alfalfares.

Las concentraciones Cr, Pb y As evaluados en las muestras de suelo en las parcelas del Distrito de Riego provenientes del uso de aguas residuales en los terrenos agrícolas, se encuentra dentro los límites de tolerancia establecidos por la Holanda.

Las concentraciones de Cd presentes en las muestras de suelo, supera los límites establecidos por Holanda con un valor de 1.4 mg/kg.

Las concentraciones de Pb obtenidas en el análisis de tejido de alfalfa se encuentran en los límites reportados por los autores citados, mientras que el Cd y el Cr se podrían considerar con una tasa de acumulación alta, lo que indica un riesgo potencial para el ganado que ingiere la alfalfa como alimento, incluso los humanos.

Los análisis realizados para todas las muestras de suelo y tejido vegetal de alfalfa no presentaron concentraciones de Arsénico.

Un estudio exhaustivo en el Distrito de Riego 003 Tula con el fin de evaluar y conocer las concentraciones de los requerimientos de macro y micronutrientes, así como de elementos contaminantes tanto en suelo como en tejido vegetal y tener un panorama completo de los pros y contras del uso de aguas residuales como riego agrícola.

México requiere normas que regulen los límites permisibles de elementos contaminantes en el suelo para el uso agrícola.

VII. LITERATURA CITADA

- Mateo-Sagasta, J., Raschid-Sally, L., & Thebo, A. (2015). Global Wastewater and Sludge Production, Treatment and Use. Wastewater. Springer, Dordrecht. Obtenido de https://doi.org/10.1007/978-94-017-9545-6_2
- Acosta, A., M. (2007). *Determinación de Metales Pesados en Suelos agrícolas del Valle del Mezquital, Hgo.* Pachuca de Soto, Hidalgo, México: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Ahumada, I., Mendoza, J., Ascar, L., & Navarrete, E. (1999). Sequential extraction of heavy metals in soils irrigated with wastewater. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 30:9-10, 1507-1519.
- Alarcón Zúñiga , B., & Cervantes Martínez, T. (2012). *Producción de Semilla de Alfalfa en el Valle del Mezquital, Hidalgo.* Texcoco, Estado de México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Bau, J. (1991). Investigación sobre la conservación del agua en Portugal. *Memorias del seminario sobre usos eficientes*, pp. 736-743.
- Berardo, A., & Marino, M. A. (2001). Producción de forraje de alfalfa bajo diferentes niveles de nutrición fosfatada en el Sudeste Bonaerense. *Agromercado N°55. Cuadernillo Forrajeras 10-13,ISSN N°1514-223X*, 1-5.
- Berardo, A.; Marino, M. A.; Erht, S. (2007). Producción de forraje de alfalfa con aplicación de fósforo superficial y profunda. *Revista de Investigaciones Agropecuarias Vol.36 núm.1*, 97-114.
- Brus, D., Lamé F., P., & R., H. (2009). National baseline survey of soil quality. *Environmental Pollution*, 157:2043-2052.
- Cadena Villegas, S. (2009). *Dinámica de crecimiento y rendimiento de alfalfa (medicago sativa L.) en respuesta a diferentes frecuencias de cosecha.* Montecillo, Texcoco de Mora, Estado de México: Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo.
- Carrillo G., R., & Cajuste J., L. (1995). Behavior of trace metals in soils of Hidalgo, Mexico. *rnal of Environmental Science and Health. Part A:Environmental Science and Engineering and Toxicology* 30:1, 143-155.
- Castillo Carrión, M., Ortega Bernaldo de Quirós, E., & Martín Rubí, J. A. (2002). Valores de referencia de elementos traza en vertisoles de la Provincia de Málaga. *Edafología* 9, 295-304.
- Cepeda Dovala, J. M. (1991). *Química de suelos.* D.F. México: Trilla S.A. de C.V.
- CIAT. (1993). *Manual de análisis de suelo y tejidp vegetal.* CIAT Centro Internacional de Agricultura Tropical.

- Cisneros Estrada, O. X., & Saucedo Rojas, H. (2016). *Reúso de aguas residuales en la agricultura*. México: IMTA, Instituto mexicano de tecnología del agua.
- Conagua. (2011). Estadísticas del agua en México, edición 2011. Elaborado a partir de: Conagua: Subdirección General de Administración del Agua. 2010.
- Departamento de Biotecnología. (1990). *QUIMICA DEL SUELO Y LOS FERTILIZANTES*. Madrid España: Universidad Politecnica de Madrid.
- Duncan, M., & Cairncross, S. (1990). Medidas de protección de la salud pública. En *Directrices para el uso sin riesgos de aguas residuales y excretas en agricultura y acuicultura* (págs. p 2-12). Ginebra. Suiza: Organización Mundial de la Salud.
- FAO. (01 de 09 de 1992). *Wastewater treatment and use in agriculture*. Rome: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Obtenido de ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN:
<http://www.fao.org/3/T0551E/t0551e0b.htm#9.%20wastewater%20use%20case%20studies>
- FAO. (2019). *La contaminación del suelo: Una realidad oculta*. Roma, Italia: FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Fitter, A. H., & Kay R., K. M. (1987). *Environmental physiology of plants*. San Diego: Academic Preess.
- García, J. C., Plaza, C., Muñoz, F., & Polo, A. (2000). *Evaluation of heavy metals pollution on barley crop by agricultural use of municipal solid waste compost*. Madrid: Centro de Ciencias Medioambientales, CSIC. Madrid. 3rd Internacional Symposium on Geotechnics related to the European Environment.
- Gilabert de Brito, J., Arrieché Luna, I., León Rodríguez, M., & López de Rojas, I. (2015). *Análisis de suelo para su diagnóstico. Manual de métodos y procedimientos de referencia*. Maracay, Venezuela: INIA Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias.
- Grasso, A., & Díaz Zorita, M. (2020). *Manual de buenas prácticas de manejo de fertilización. 2da. Edición*. Buenos Aires, Argentina: Fertilizar A.C.
- Hogan, C. (2010). Heavy metal. . Washington, D.C.: National council for science and the environment. .
- IBM Corp;. (2017). IBM SPSS Statistics para Windows, versión 25.0. Armonk, Nueva York: IBM Corp.
- INTA. (2007). El cultivo de la alfalfa en la Argentina. En E. I. INTA. Argentina: INA Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

- Kabata-Pendias, A., & Pendias, H. (1984). *Agricultural problems related to excessive trace metal contents of soils*. Springer, Berlin: Förstner U., Salomons W., Mader P. (eds) Heavy Metals. Environmental Science.
- Lara, J. A., & Hernández, A. (01 de 09 de 2021). *Reutilización de aguas residuales: Aprovechamiento de los nutrientes en riego agrícola*. Obtenido de <http://www.ingenieroambiental.com/4014/riego.pdf>
- Lazcano Carreño, C. (2016). *BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL DE AGUAS Y AGUAS RESIDUALES*. Bogotá, Colombia: Ediciones ECOE.
- Lucho-Constantino, C. A., Prieto-García, F., Del Razo, L., Rodríguez Vázquez, R., & Poggi-Varaldo, H. M. (2005). Chemical fractionation of boron and heavy metals in soils irrigated with wastewater in central Mexico. *Agriculture, Ecosystems & Environment Vol.108, Issue.1*, Pages 57-71.
- McBride, M. B. (1994). *Environmental Chemistry of soils*. New York: Oxford University Press.
- Mills, H. A., Benton Jones, J., & Wolf, B. (1996). *Plant Analysis Handbook II: A Practical Sampling, Preparation, Analysis, and Interpretation Guide*. Athens: Micro-Macro Publishing.
- Morón, A. (08 de 09 de 2021). *Alfalfa: Fertilidad de suelos y estado nutricional en sistemas agropecuarios de Uruguay*. Obtenido de INPOFOS Cono Sur: <http://www.inia.org.uy/sitios/lesis/fertilizacion/IPNIAlfalfaUruguayMoron.pdf>
- Osorio, J. (2006). *Estrategia de evaluación de usos conjuntivos del agua, incluyendo reuso para contribuir con la seguridad alimentaria de distritos agroalimentarios proyectados en el Valle de Cauca, Colombia*. Cali, Colombia: Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle.
- Pautasso, J. M., & Barbagelata, P. A. (2017). Actualización del umbral de fósforo Bray para el cultivo de alfalfa en Entre Ríos (Argentina). *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*, 13-16.
- Pérez, F. (2017). *Fisiología Vegetal Parte III. Nutrición Mineral*. Perú: Universidad Nacional de Ucayali.
- Pérez, L., Moreno, A. M., & González, J. (2000). Valoración de la Calidad de un Suelo en Función del. *Edafología* 7, 113-120.
- Plevich, J. O., Delgado, Á. R., Tarico, J. C., Crespi, R. J., & Barotto, O. M. (2012). El cultivo de Alfalfa utilizando agua de perforación, agua residual urbana y precipitaciones. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 16(12), 1-7.
- Porta, J., López Acevedo, M., & Roquero de Laburu, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente 3ra. Ed.* Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.

- Prieto-Garcia, F., Lucho Constantino, C. A., Poggi Valardo, H., Alvarez Suárez, M., & Barrado Esteban, E. (2007). Caracterización fisicoquímica y extracción secuencial de metales y elementos trazas en suelos de la región Actopan-Ixquimilpan del distrito de riego 03, Valle del Mezquital, México. *Ciencia Ergo Sum Vol. 14, núm.1*, pp. 69-80.
- Quiñonez, A., Romero, L., Dalla Fontana, L. A., Longoni, M., & Colombo, S. (2008). Fertilización fosfatada y azufrada en alfalfa. *Ciencias Agrarias*, 75-80.
- Ramírez Niño, M. Á., & Navarro Ramírez, M. Á. (2015). Análisis de metales pesados en suelos irrigados con aguas del río Guatiquía. *Revista Ciencia en Desarrollo, Vol. 6 No. 2*, pp.165-175.
- Rueda Saa, G., Rodríguez Victoria, J. A., & Madriñan Molina, R. (2011). Metodologías para establecer valores de referencia de metales pesados en suelos agrícolas: Perspectivas para Colombia. *Acta Agronómica vol. 60, núm. 3*, 203-218.
- Sadzawka R., A., Grez Z., R., Carrasco R., M., & Mora G., M. (2004). *Métodos de Análisis de Tejidos Vegetales*. Chile: CNA COMISIÓN DE NORMALIZACIÓN Y ACREDITACIÓN SOCIEDAD CHILENA DE LA CIENCIA DEL SUELO.
- SEMARNAT, S. (2002). *NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-021-SEMARNAT-2000 QUE ESTABLECE LAS ESPECIFICACIONES DE FERTILIDAD, SALINIDAD Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS, ESTUDIO, MUESTREO Y ANÁLISIS*. Obtenido de DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN: http://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=717582
- Siebe, C. (1994). Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el Distrito de Riego 03, Tula, Hidalgo, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental Vol.10 No.1*, 15-21.
- Silva, J., Torres, P., & Madera, C. (2008). Reuso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión. *Agronomía Colombiana Vo.26 núm.2*, pp 347-359.
- Tan, K. (2009). *Environmental soil science*. . Editorial CRC. .
- Toral, F. Y. (1996). *Estudio comparativo de esquemas de especiación en muestras sólidas de interés medioambiental. Trabajo de Licenciatura*. España: Universidad de Valladolid.
- USDA. (2014). Claves para la taxonomía de suelo. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Décima segunda Edición.
- USDA, D. (1999). Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. En USDA, *Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo* (págs. 56-57). Estados Unidos de America: USDA.
- Vázquez Alarcón, A., Justin Cajuste, L., Siebe Grabach, C., Alcántar González, G., & De las Isla de Bauer, M. (2001). Cadmio, Níquel y Plomo en aguas residual, suelo

y cultivos en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Revista Agrociencia* Vol. 35, núm. 3, 267-274.

Vivas, H., & Quaino, O. (1999). *Fósforo y enmienda cálcica para la producción de alfalfa en dos suelos del Centro Este de Santa Fe*. Obtenido de INTA Rafaela: <http://rafaela.inta.gov.ar/anuario1999/p69.htm>

Werner, J., Paulino, V., Cantarella, H., Andrade, N. d., & Quaggio, J. (1996). Forrageiras. En *Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo*. (págs. Capítulo 24. 261-273 p). Boletim Técnico 100. Instituto Agronômico-Fundação IAC.

West Analítica. (2021). *El cultivo de alfalfa*. Obtenido de West Analítica y Servicios S.A. de C.V.: Vista: 10-09-2021. <https://westanalitica.com.mx/wp-content/uploads/2018/05/El-Cultivo-de-ALFALFA.pdf>