

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

POSTGRADO EN CIENCIAS MATEMÁTICAS

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN EN UN SISTEMA DE FERTILIZACIÓN
DE HORTALIZAS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
MAESTRO EN CIENCIAS MATEMÁTICAS

PRESENTA

Lic. José Antonio Chávez Castillo

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Hugo Adán Cruz Suárez

ASESOR EXTERNO

Dr. José Luis Alcántara Flores

Puebla, Puebla. 2019

A Beatriz León Romero

Agradecimientos

A mis directores de tesis:

Dr. Hugo Adán Cruz Suárez y
Dr. José Luis Alcántara Flores.

A mi jurado de tesis:

Dr. Francisco Solano Tajonar Sanabria,
Dr. Bulmaro Juárez Hernández,
Dr. Fernando Velasco Luna,
Dr. Víctor Hugo Vázquez Guevara y
Dr. Marco Antonio Mora Ramírez.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

Resumen

El desarrollo de nuevos modelos agrícolas enfocados en procesos sostenibles, demandan investigar metodologías que permitan aprovechar los recursos locales aún no extraídos, pero fácilmente disponibles y baratos. Bajo este contexto, la orina humana fermentada (OHF) es una opción que ha sido reportada como un excelente fertilizante debido a su alto contenido de nutrientes, constituyendo una alternativa de bajo costo y de alta calidad; sin embargo, aún se necesitan más investigaciones para tener un completo entendimiento de causalidad. En consecuencia, si la experimentación es un eje dinámico de la investigación y parte medular del método científico; entonces, generar experimentos en relación a este fenómeno de estudio, el uso de la OHF como fertilizante agrícola, permitirá tener un conocimiento inteligible sobre la OHF como fuente alternativa de nutrientes para cultivos.

Las hortalizas lechuga y betabel, donde Puebla ocupa el tercer y primer lugar en producción nacional, respectivamente, motivaron una investigación basada en experimentaciones para determinar qué concentraciones de OHF estimulan su desarrollo vegetativo, respectivamente.

En el diseño del experimento en cultivo de lechuga (variedad waldman green) se propusieron cuatro concentraciones de OHF: 0, 66, 132 y 198 kg N ha⁻¹; el análisis de la varianza prueba que no existe efecto de tratamientos para cada una de las variables de respuesta propuestas (longitud de hoja, $p = 0.412$; ancho de hoja, $p = 0.308$ y peso de planta, $p = 0.258$); por otra parte, en el experimento efectuado en cultivo de betabel (variedad red pack) se propusieron cinco concentraciones de OHF: 0, 30, 60, 120 y 240 kg N ha⁻¹, y el análisis de la varianza prueba que existe efecto de tratamientos ($p = 0.000199$) para la variable de respuesta peso de planta, donde la concentración de 120 kg N ha⁻¹ de OHF dio el mejor rendimiento, y una segunda experimentación en cultivo de betabel lo reafirmo; modificando el sustrato de cultivo a vermiculita se observó un efecto de tratamientos altamente significativo, ya que el p – *valor* fue de 1.45×10^{-15} . Con lo cual, se puede concluir la posible viabilidad de ocupar la OHF como fertilizante para cultivo de betabel.

Índice general

| | |
|---|-----------|
| Resumen | 1 |
| 1. Introducción | 5 |
| 1.1. El sistema de saneamiento ecológico (Eco-San) | 5 |
| 1.2. La orina humana (OH) | 8 |
| 1.3. Cultivo de hortalizas | 11 |
| 1.4. Experimentación: el uso de OHF en agricultura | 13 |
| 1.5. Diseño y análisis de experimentos | 15 |
| Antecedentes | 26 |
| Justificación | 29 |
| Objetivos | 31 |
| Hipótesis | 32 |
| 2. Metodología de los experimentos iniciales | 33 |
| 2.1. Metodología para la orina | 33 |
| 2.2. Metodología para el sustrato | 34 |
| 2.3. Metodología para la planta | 35 |
| 2.4. Metodología de las experimentaciones | 36 |
| 2.5. Algunas observaciones de los experimentos | 43 |
| 3. Análisis de los experimentos iniciales | 45 |
| 3.1. Caracterización de la orina humana | 45 |
| 3.2. Caracterización del sustrato | 46 |
| 3.3. Caracterización de la planta | 46 |
| 3.4. Gráficas y ANOVA | 46 |
| 3.5. Inferencias sobre las experimentaciones | 54 |
| 4. Metodología del experimento final | 57 |
| 4.1. Metodología para la orina | 57 |
| 4.2. Metodología para el sustrato | 57 |
| 4.3. Metodología para el agua | 58 |
| 4.4. Metodología para la planta | 58 |
| 4.5. Metodología de la experimentación | 60 |
| 4.6. Algunas observaciones del experimento | 64 |

| | |
|---|-----------|
| 5. Análisis del experimento final | 65 |
| 5.1. Caracterización de la orina humana | 65 |
| 5.2. Caracterización del sustrato | 66 |
| 5.3. Caracterización del agua | 66 |
| 5.4. Gráficas y ANOVA | 67 |
| 5.5. Inferencias sobre la experimentación | 69 |
| 6. Conclusiones | 71 |
| Bibliografía | 72 |
| Apéndice | 76 |
| A. | 77 |
| B. | 81 |

Capítulo 1

Introducción

El presente capítulo tiene como objetivo situar al lector dentro de las investigaciones y teorías sobre las cuales se fundamenta este trabajo de tesis; ocupando un método deductivo partiremos de los conceptos más generales que nos pueden dar una perspectiva amplia de la investigación para pasar a los conceptos particulares que están involucrados de manera directa con el trabajo realizado. Las primeras cuatro secciones:

- El sistema de saneamiento ecológico (Eco-San),
- La orina humana (OH),
- Cultivo de hortalizas,
- Experimentación: el uso de la orina humana fermentada (OHF) en agricultura,

tienen una relación estrecha y sustentan parcialmente la investigación experimental realizada, por otra parte, tienen también el propósito de acotar el problema de investigación y servir como precedente para la elaboración de los antecedentes, la justificación, los objetivos y las hipótesis.

La última sección:

- Diseño de experimentos

nos brinda los fundamentos y las herramientas necesarias para realizar la investigación experimental, se detallan de manera puntual solo las técnicas o procedimientos necesarios para el desarrollo de la tesis.

1.1. El sistema de saneamiento ecológico (Eco-San)

Las aguas residuales a menudo contienen recursos valiosos (por ejemplo, materia orgánica y nutrientes). A diferencia de los enfoques de saneamiento convencionales, inodoros con descarga de agua y la recolección de aguas residuales mixtas principalmente a través de un sistema de alcantarillado gravitacional con agua masiva como medio de transporte, el Sistema de Saneamiento Ecológico (Eco San) se basa en el **cierre de los ciclos de flujo de material para recuperar recursos con demandas minimizadas de otros recursos.**

De acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento (Artículo 3, parrafo VI) se consideran “aguas residuales” aquellas aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos público urbano, doméstico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento y en general, de cualquier uso, así como la mezcla de ellas.

Además, el Artículo 7 párrafo VII señala:

Se declara de utilidad pública: **El mejoramiento de la calidad de las aguas residuales, la prevención y control de su contaminación, la recirculación y el reúso de dichas aguas**, así como la construcción y operación de obras de prevención, control y mitigación de la contaminación del agua, incluyendo plantas de tratamiento de aguas residuales.

A nivel nacional se cuenta con 1941 plantas de tratamiento de aguas residuales del sector privado y paraestatal, las cuales tienen una capacidad instalada de 159090 litros por segundo (1 s^{-1}) y el caudal en operación es de 107706 l s^{-1} . De acuerdo con el Módulo 5, Agua potable y Saneamiento del Censo de Gobiernos Municipales y Delegacionales 2015, de los 2457 municipios y delegaciones en nuestro país, solamente 827 (34%) cuentan con servicio de tratamiento de aguas residuales municipales, en tanto 1628, que equivalen al 66%, no cuentan con este servicio y 2 municipios no proporcionaron información al respecto.

Casi la mitad de la población mundial vive actualmente sin sistemas de saneamiento adecuados según la norma moderna, la mayoría de ellos en países en vías de desarrollo, y muchos ni siquiera tienen baños sanitarios. Es un gran desafío proporcionar sistemas y servicios de saneamiento ambiental para estas personas de acuerdo con la asequibilidad, durabilidad, conveniencia, diseño estético y efectividad. La degradación ambiental, la escasez de recursos y el crecimiento de la población alimentan aún más el círculo vicioso de saneamiento deficiente. El Saneamiento Convencional (Con-San), simbolizado por los inodoros con descarga de agua y la recolección de aguas residuales mixtas, principalmente a través de un sistema de alcantarillado gravitacional con agua masiva como medio de transporte, tiene demasiadas desventajas en los tratamientos terminales de aguas residuales y desechos, como la necesidad de equipos complejos y experiencia para operar y mantener el sistema, consumiendo grandes cantidades de energía y recursos; al mismo tiempo deja muchas emisiones a los entornos ecológicos, lo que se considera cada vez más insostenible en las últimas décadas (Hu et al., 2016).

El Eco-San es un enfoque alternativo para realizar un saneamiento sostenible. Se le conoce como el saneamiento orientado a los recursos y se basa en enfoques de ecosistemas, cierre de los ciclos de flujo de materiales, tendencia novedosa en el tratamiento de la contaminación (partiendo de la eliminación de aguas residuales hasta la recuperación de recursos), y una reconceptualización del saneamiento; en síntesis, el Eco-San apunta a emular los sistemas de saneamiento de los procesos ecológicos naturales. La utilidad en beneficio social-ambiental de los sistemas de saneamiento, denominados genéricamente como Eco San, es una de las características más relevantes para evaluarlos; la evaluación nos permitirá determinar la eficacia y viabilidad que pueda tener cada uno de los sistemas de saneamiento. Las investigaciones sobre la evaluación de los sistemas Eco-San es variada, pero podemos destacar las siguientes líneas de investigación:

- ▶ Fuente de aguas residuales
 - Aplicación de la orina humana, ←
 - Tratamiento de la orina humana y heces, ←
 - Compostaje de heces,
 - Compostaje de heces y residuos de comida.

- ▶ Funcionamiento
 - Factibilidad económica,
 - Factibilidad de carácter técnico,
 - Impacto social y/o ambiental. ←

► Proceso de tratamiento

- Sanitario inodoro, ←
- Recolección de fuentes separadas de aguas residuales domésticas,
- Tecnologías de tratamiento de diferentes aguas residuales,
- Aceptabilidad de la sociedad.

En el presente trabajo seguiremos las líneas de investigación: tratamiento y aplicación de la orina humana, sanitario inodoro e impacto ambiental; cada una de ellas enfatizadas en la lista anterior con la señal ←.

Sanitarios secos con separación de orina (UDDT)

El sanitario seco es un tipo de sanitario inodoro que *no necesita usar el agua como medio de transporte*, pero se permite el uso de poca agua para la limpieza. En este sentido, el sanitario seco también implica que generalmente no está disponible para un sistema de alcantarillado, y los desechos del inodoro necesitan permanecer almacenados en algún lugar temporalmente (Hu et al., 2016).

Un sanitario seco con separación de orina (UDDT; por las siglas en inglés de Urine-Diverting Dry Toilet) es un tipo de sanitario seco, sin necesidad de agua de arrastre, que proporciona un saneamiento ambiental seguro y asequible para cualquier contexto en el mundo, Figura 1.1. Son inodoros equipados con dos tazones, uno delantero para la recolección de orina y uno trasero para material fecal, el UDDT está conectado a dos recipientes de almacenamiento donde se captan por separado la orina y las heces, el recipiente (tanque, bidón, garrafón) usado para la recolección de orina debe permitir un almacenamiento en estado anaeróbico para la correcta sanitización del producto; por otra parte, en el tanque recolector de heces es necesario cubrirlos en cada descarga con materiales en polvo, por ejemplo, aserrín, cenizas de plantas o arenas finas. Los revestimientos podrían mejorar la estética y disminuir el olor de las heces. Los diferentes revestimientos dan como resultado un tiempo diferente para la inocuidad, generalmente al menos 3 meses para las cenizas de plantas y 10 meses para el aserrín o las arenas (Hu et al., 2016).

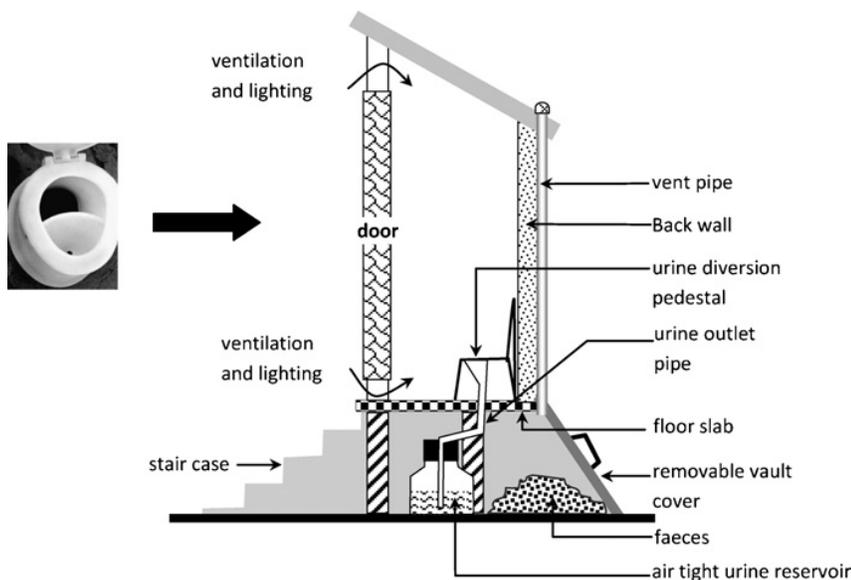


Figura 1.1: Diseño esquemático de UDDT propuesto por Larsen y Gujer (1996).

1.2. La orina humana (OH)

La orina humana (OH) es un líquido residual producto del cuerpo humano secretado por los riñones mediante un proceso de filtración de la sangre y excretado a través de la uretra. Lehninger (1978) describe el proceso de filtración:

El plasma sanguíneo se filtra a través de unas estructuras microscópicas denominadas glomérulos que están situadas en la capa externa del riñón. Estos filtros permiten el paso de los solutos del plasma sanguíneo, con excepción de las proteínas y de las lipoproteínas, hacia los túbulos renales. A medida que el filtrado glomerular avanza por estos túbulos, catión sodio (Na^+), cloruro (Cl^-), glucosa, aminoácidos y agua son reabsorbidos y pasan a la sangre a través de unos finos capilares sanguíneos que rodean a dichos túbulos renales. Como resultado el filtrado glomerular se va concentrando al ir circulando por los túbulos, de suerte que cada mililitro de orina final se ha formado a partir de unos 50 a 100 ml de filtrado glomerular. (p.850)

La orina está compuesta de 91 – 96% de agua y el resto puede ser en general caracterizado en sales¹ inorgánicas, urea, componentes orgánicos y sales de amonio orgánico (Rose et al., 2015).

Cada individuo produce entre 1 y 5 litros de orina por día; la generación de orina depende del balance de agua en el cuerpo y generalmente el volumen de agua bebida como fluido es igual al volumen de orina producida (Rose et al., 2015). Jönsson et al. (2004) mencionan que una persona adulta excreta en promedio 500 litros de orina por año.

Composición

De las excretas humanas, la orina contiene la mayor parte de las excreciones diarias de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) contribuyendo con el 88%, 67% y 73%, respectivamente (Karak y Bhattacharyya, 2011; Kirchmann y Pettersson, 1995). No obstante, la composición de la OH varía de persona en persona y de región en región dependiendo de los hábitos alimenticios, la cantidad de agua ingerida, las actividades físicas, el tamaño corporal y los factores ambientales. El Cuadro 1.1 presenta un resumen de la composición físico-química de la orina humana.

Características químicas

El nitrógeno es uno de los principales componentes de la orina humana; en la orina fresca no diluida, la concentración total de N varía entre 7 – 9 g l^{-1} (Guyton y Hall, 2011), en la que la suma de nitrógeno ureico, amoníaco y nitrogéno en ácido úrico asciende al 90 – 95% del N total (Kirchmann y Pettersson, 1995). La urea, producida a través del metabolismo de las proteínas, es el compuesto nitrogenado principal que asciende al 85% del total de N en orina y más del 50% del total de sólidos orgánicos (Rose et al., 2015). La OH fresca tiene una reacción ligeramente ácida y el ácido úrico y el urato son escasamente insolubles; sin embargo, **en una reacción alcalina, causada por la descomposición de la urea durante el almacenamiento, el ácido úrico y el urato se vuelven fácilmente solubles y, por lo tanto, pueden descomponerse** (Kirchmann y Pettersson, 1995).

A diferencia del nitrógeno, el fósforo contenido en la OH puede combinarse químicamente con amonio y magnesio para formar estruvita (Karak y Bhattacharyya, 2011).

¹Una sal es un compuesto químico formado por cationes (iones con carga positiva) enlazados a aniones (iones con carga negativa) mediante un enlace iónico.

Cuadro 1.1: Composición físico-química de la OH citada en la bibliografía.

| Parámetro | Valor | Referencia(s) |
|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| pH | 9.2 | Pradhan et al. (2009) |
| | 8.9-8.96 | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| Conductividad | 47.2 mS cm ⁻¹ | Pradhan et al. (2010) |
| | 14.8-25.4 mS cm ⁻¹ | Jönsson et al. (2004) |
| Densidad | 1003-1035 g l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| DBO | 180 mg l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| N total | 7-9 g l ⁻¹ | Guyton y Hall (2011) |
| | 8.36 g l ⁻¹ | Pradhan et al. (2009) |
| | 2.4-3.1 g l ⁻¹ | Heinonen-Tanski et al. (2007) |
| | 1.795-2.610 g l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| NH ₄ ⁺ -N | 8.57 g l ⁻¹ | Pradhan et al. (2009) |
| | 2.3-2.9 g l ⁻¹ | Heinonen-Tanski et al. (2007) |
| | 1.117-1.726 g l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| | 0.574-0.773 g l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| NH ₃ -N | 0.574-0.773 g l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| Amino acid-N | 0.104-0.110 g l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| NO ₃ -N | 0.01 g l ⁻¹ | Pradhan et al. (2009) |
| | 45 μg l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| NO ₂ -N | 10-20 μg l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| Urea | 85% del total de N | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| P total | 0.7 g l ⁻¹ | Pradhan et al. (2009) |
| | 0.15-0.23 g l ⁻¹ | Heinonen-Tanski et al. (2007) |
| | 0.20-0.21 g l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| | 3.23-3.39 mequiv.l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| HPO ₄ | 3.23-3.39 mequiv.l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| PO ₄ ⁻ - P | 2.03 g l ⁻¹ | Pradhan et al. (2010) |
| K total | 2 g l ⁻¹ | Pradhan et al. (2009) |
| | 0.59-1.3 g l ⁻¹ | Heinonen-Tanski et al. (2007) |
| | 0.875-1.150 g l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| | 0.175-0.225 g l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| S | 0.175-0.225 g l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| Cl ⁻ | 3.03 g l ⁻¹ | Pradhan et al. (2010) |
| | 2.24-2.50 g l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| Al | 0.185-0.210 mg l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| B | 0.435-0.440 mg l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| Ca | 13.34-15.75 mg l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| Cd | 0.2 μg l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| Co | 1-12 μg l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| Cr | 7 μg l ⁻¹ | Jönsson et al. (2004) |
| | 2-4 μg l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| Cu | 67 μg l ⁻¹ | Jönsson et al. (2004) |
| | 155 μg l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| Fe | 0.165-0.205 mg l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| Hg | 0.44-0.55 μg l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| Mg | 1.5-1.63 mg l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| Na | 0.938-0.982 g l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| Na ⁺ | 2.34 g l ⁻¹ | Pradhan et al. (2010) |
| Ni | 5 μg l ⁻¹ | Jönsson et al. (2004) |
| | 15-227 μg l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| Pb | 1 μg l ⁻¹ | Jönsson et al. (2004) |
| | 2 μg l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |
| Zn | 30 μg l ⁻¹ | Jönsson et al. (2004) |
| | 70-110 μg l ⁻¹ | Kirchmann y Pettersson (1995) |

Los otros solutos principales excretados en la orina son sodio (Na) y potasio (K) que se derivan en gran parte de la ingesta dietética (Rose et al., 2015). En los estudios realizados por Kirchmann y Pettersson (1995) y Pradhan et al. (2010) se analizó la cantidad de Na en la OH reportando un contenido de $0.938 - 0.982 \text{ g l}^{-1}$ y 2.34 g l^{-1} , respectivamente; la variación de ambos estudios respecto a la cantidad de sodio es consecuencia de la orina obtenida de dos regiones distintas, la primera en Suecia y la segunda en Finlandia.

Características microbiológicas

Aunque la OH no es totalmente estéril, ya que contiene una disminuida cantidad de diferentes microorganismos entéricos, **puede ser fácilmente desinfectada mediante el almacenamiento** (Schönning et al., 2002). Los patógenos tradicionalmente conocidos por ser excretados en la orina son *Leptospira interrogans*, *Salmonella typhi*, *Salmonella paratyphi* y *Schistosoma haematobium*; existe una gama de otros patógenos que se han detectado en la orina, pero su presencia puede considerarse no significativa para el riesgo de transmisión (Schönning y Stenström, 2004).

Los diferentes microorganismos estudiados en la OH, citados en la bibliografía, se presentan en el Cuadro 1.2.

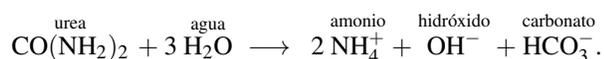
Cuadro 1.2: Microorganismos estudiados en la OH.

| Microorganismos patógenos | Referencia(s) |
|-------------------------------|-------------------------------|
| <i>Ascaris ova</i> | Heinonen-Tanski et al. (2007) |
| <i>Campylobacter jejuni</i> | Höglund et al. (2002) |
| <i>Clostridia</i> sp. | Pradhan et al. (2010) |
| <i>Colifagos</i> sp. | Pradhan et al. (2010) |
| <i>Colifago</i> MS2 | Chandran et al. (2009) |
| <i>Cryptosporidium parvum</i> | Schönning et al. (2004) |
| <i>Enterococcus</i> sp. | Höglund et al. (2002) |
| | Pradhan et al. (2010) |
| | Heinonen-Tanski et al. (2007) |
| <i>Enterococcus faecalis</i> | Chandran et al. (2009) |
| <i>Escherichia coli</i> | Chandran et al. (2009) |
| <i>Rotavirus</i> sp. | Höglund et al. (2002) |
| <i>Salmonella enterica</i> | Chandran et al. (2009) |
| <i>Salmonella typhimurium</i> | Höglund et al. (2002) |
| <i>Huevos de Schistosoma</i> | Heinonen-Tanski et al. (2007) |

La orina humana fermentada (OHF)

La Orina Humana Fermentada (OHF) se obtiene como producto del proceso de fermentación anaeróbica de la OH, a través de este proceso de fermentación la composición físico-química de la orina se modifica. El mecanismo de modificación de la orina mediante el almacenamiento anaeróbico es descrito por Jönsson et al. (2004):

Al momento de la excreción el pH de la orina está generalmente alrededor de 6. Del 75 al 90% del N es excretado como urea y el porcentaje remanente, principalmente, como amonio y creatinina. En la presencia de la enzima ureasa, la urea es rápidamente degradada a amonio y dióxido de carbono, y los iones de hidróxido producidos normalmente incrementan el pH a 9–9.3.



De acuerdo con Kirchmann y Pettersson (1995), la OHF está compuesta principalmente de ocho tipos de iones: los cationes Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Ca^+ y los aniones Cl^- , SO_4^- , PO_4^- y HCO_3^- . Más del 90% del nitrógeno total en la OH

se encuentra en forma de nitrógeno-amoniaco, la urea y el urato se han descompuesto durante el almacenamiento, siendo el compuesto dominante el bicarbonato de amonio, en niveles de microgramos por litro se encuentra el cobre, zinc, hierro y boro.

1.3. Cultivo de hortalizas

Los requisitos para el crecimiento de las plantas incluyen luz, agua, nutrientes y una estructura para el crecimiento de las raíces. Los nutrientes usados en cantidades mayores son los elementos no-minerales, por ejemplo el carbono, el hidrógeno y el oxígeno. Estos elementos son tomados principalmente como dióxido de carbono (CO_2) del aire y agua (H_2O) por las raíces. Al incrementar el suministro de luz, dióxido de carbono, agua y nutrientes minerales del rango de deficiencia aumenta la tasa de crecimiento y producción de los cultivos.

Los nutrientes pueden ser divididos en dos categorías: macronutrientes y micronutrientes. La absorción de macronutrientes es alrededor de 100 veces la de micronutrientes. Los seis elementos generalmente clasificados como macronutrientes son nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), azufre (S), calcio (Ca) y magnesio (Mg). Estos nutrientes son principalmente tomados del suelo por las raíces en forma iónica.

El N es frecuentemente el nutriente más limitante para el crecimiento de las plantas y el uso del N es usualmente más alto que el uso total de los otros macronutrientes y micronutrientes en conjunto. El N es tomado por las plantas en forma de iones de nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+). Las principales fuentes naturales de N disponible para las plantas son la degradación de la materia orgánica en el suelo y la fijación de N de los microorganismos que viven en simbiosis con las raíces de las leguminosas.

El P es tomado por las plantas en forma de iones de fosfato (principalmente como HPO_4^{2-} y H_2PO_4^- a un pH entre 5 y 7). El abastecimiento natural de P disponible para las plantas proviene de la disolución de sulfatos solubles en el suelo y de la mineralización de la materia orgánica. La alta solubilidad del K en el agua a menudo resulta en una buena dotación de K disponible para las plantas. Sin embargo, muchos cultivos, como las hortalizas, necesitan grandes cantidades de K y por lo tanto, la fertilización adicional con K puede mejorar el crecimiento de las plantas. El S es también altamente soluble en agua y la mayoría de cultivos lo necesitan en cantidades menores a las del P. Los micronutrientes son tan esenciales para el crecimiento de las plantas como los macronutrientes, pero son tomados en pequeñas (micro) cantidades. Los elementos considerados micronutrientes son el boro (B), el cobre (Cu), el hierro (Fe), el cloro (Cl), el manganeso (Mn), el molibdeno (Mo) y el zinc (Zn). La mayoría de los micronutrientes son necesarios para formar diferentes enzimas. Estos nutrientes están normalmente disponibles en cantidades suficientes en el contenido inicial de suelo y en la mineralización del material orgánico. Solamente en circunstancias especiales la escasez de los micronutrientes limita el crecimiento de las plantas.

Cultivo de lechuga

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) es una hortaliza formada por grandes hojas que pueden ser algo dentadas y que se disponen unas sobre otras formando en algunos casos un repollo. Aunque la lechuga se produce en diversos estados de la República, los tres principales productores del país son Guanajuato, Zacatecas y Puebla (SIAP, 2018).

Desde el punto de vista de la absorción de los nutrientes, el ciclo de la lechuga puede dividirse en dos fases fenológicas²: la primera que comienza con la emergencia de la planta y se prolonga hasta la formación de las primeras hojas internas, la segunda fase, se extiende desde la aparición de las primeras hojas internas hasta el final del ciclo. En la segunda fase la lechuga absorbe el 50% de los nutrientes totales requeridos; en ese momento tiene lugar la mayor producción de materia seca. La lechuga es muy sensible a sobredosis de fertilizantes amoniacales;

²La fenología estudia la relación entre los factores climáticos y los ciclos de los seres vivos.

por lo cual la aplicación de fertilizantes debe ser en dos o tres etapas; las necesidades de nitrógeno aproximadas durante todo el ciclo son de 90 a 100 kilogramos por hectárea (kg ha^{-1}) (González y Zepeda, 2013).

En México, según registros del SIAP, Puebla está entre los tres principales productores de lechuga en el año 2017, con una superficie sembrada de 3259.54 ha en modalidad de riego y temporal, y una producción de 69409.64 ton, Cuadro 1.3.

Cuadro 1.3: Producción de lechuga (ton/año) en modalidad de riego+temporal en los años 2015-2017 en los principales estados productores y a nivel nacional.

| Año | Principales estados productores de lechuga(ton) | | | Producción nacional(ton) |
|------|---|-----------|----------|--------------------------|
| | Guanajuato | Zacatecas | Puebla | |
| 2017 | 141783.42 | 86334.00 | 69409.64 | 480808.07 |
| 2016 | 108384.83 | 82706.20 | 66501.70 | 439830.96 |
| 2015 | 112921.98 | 76285.34 | 65436.24 | 437561.70 |

Cultivo de betabel

También conocido como remolacha, el betabel (*Beta vulgaris* L.) es un tubérculo comestible de color púrpura intenso y que tiene forma de bulbo; prefiere los climas fríos para su desarrollo y en México puede cosecharse durante todo el año. Perteneciente a la familia de las amarantáceas, el betabel posee un sabor muy dulce que se aprovecha para la obtención de azúcar y su pulpa para colorantes. El color del betabel se debe a la betacianina, una sustancia que contribuye a la prevención del cáncer (SAGARPA, 2016).

El betabel es sensible a pH ácidos y se desarrolla mejor en suelos neutros y alcalinos, prefiriendo pH de 6.5 – 7.5, aunque algunas veces a pH mayores de 7.6 se puede presentar deficiencia de boro lo mismo que clorosis debido a la deficiencia de magnesio (Gregorio, 2010).

El sodio es un elemento que se encuentra en todas las plantas. Sin embargo, en el caso del betabel este elemento aumenta la producción y contenido de azúcar; además reduce la pérdida de agua y la marchitez de follaje en las épocas de sequía. El betabel está clasificado como una hortaliza altamente tolerante a la salinidad, alcanzando valores de 6400 a 7680 partes por millón (ppm) (Mass, 1984).

Se sugiere fraccionar el nitrógeno en dos aplicaciones; las altas concentraciones de N disminuyen la coloración del betabel (Valadez, 1994).

Los fertilizantes potásicos favorecen la formación de raíces tiernas y azucaradas, pero deben equilibrarse con fertilizantes fosfóricos que hacen los tejidos más sólidos y resistentes a enfermedades (Mainardi, 1978).

Valadez (1994) reporta la extracción de los principales nutrientes del suelo en cultivo betabel, Cuadro 1.4.

Cuadro 1.4: Relación entre planta, rendimiento y extracción de nutrientes.

| Parte de la planta | Rendimiento (ton/ha) | Extracción de nutrientes (kg/ha) | | | |
|--------------------|----------------------|----------------------------------|-----|-------|--------|
| | | N | P | K | Ca |
| Raíz | 22.4 | 73.92 | 8.9 | 89.6 | 7.84 |
| Follaje | 14.56 | 96.32 | - | 60.48 | 107.52 |

En México, según registros del SIAP, Puebla es el mayor productor de betabel en los últimos 21 años; en 2017 Puebla produjo 8622.09 ton de betabel seguido de Jalisco con 3224.17 ton y Sonora con 3004.50 ton, en el mismo año México alcanzó una producción de 20642.44 ton de betabel, Cuadros 1.5 y 1.6.

1.4 Experimentación: el uso de OHF en agricultura

Cuadro 1.5: Producción de betabel (ton/año) en modalidad de riego+temporal durante los años 2015-2017 en Puebla, Jalisco, Sonora y a nivel nacional.

| Año | Principales estados productores de betabel(ton) | | | | Producción nacional(ton) |
|------|---|---------|---------|----------------|--------------------------|
| | Puebla | Jalisco | Sonora | Edo. de México | |
| 2017 | 8622.09 | 3224.17 | 3004.50 | 1613.50 | 20642.44 |
| 2016 | 9435.83 | 3320.60 | 1359.50 | 1429.00 | 18190.84 |
| 2015 | 8444.09 | 3660.49 | 1932.40 | 1243.26 | 17074.32 |

Cuadro 1.6: Producción de betabel (ton/año) en modalidad de riego+temporal durante los años 2015-2017 en el estado de Puebla.

| Municipio | Producción de betabel (ton) | | | Municipio | Producción de betabel (ton) | | |
|----------------------|-----------------------------|---------|----------|--------------------|-----------------------------|--------|--------|
| | 2017 | 2016 | 2015 | | 2017 | 2016 | 2015 |
| Quecholac | 2523.15 | 2638.00 | 2,456.00 | S.I. Cholula | 143.65 | 158.95 | 150.44 |
| Los Reyes de Juárez | 2010.40 | 1871.00 | 1,891.80 | Atlixco | 129.00 | 120.38 | 128.63 |
| Acatzingo | 994.40 | 1033.70 | 952.14 | S. M. Texmelucan | 108.96 | 72.00 | 89.99 |
| Palmar de Bravo | 741.60 | 702.00 | 621.00 | S. M. Tlalancaleca | 75.44 | 117.02 | 107.92 |
| Tepeaca | 726.60 | 722.50 | – | S.S. El Verde | 66.40 | 82.00 | 79.56 |
| S.P. Cholula | 405.50 | 927.93 | 1005.52 | Tecamachalco | 60.90 | 40.00 | 95.96 |
| Cuapixtla de Madero | 245.20 | 338.00 | 257.00 | Huaquechula | 42.30 | 50.40 | 47.50 |
| Gral. Felipe Ángeles | 162.89 | 200.00 | 138.00 | Huitziltepec | 39.00 | 21.95 | 66.00 |
| S. A. Cholula | 146.70 | 162.00 | 159.60 | Chiautzingo | – | 178.00 | 197.03 |

1.4. Experimentación: el uso de OHF en agricultura

Disminución de fertilidad de los suelos agrícolas, alta demanda de alimentos y soberanía alimentaria constituyen los mayores desafíos para la producción de alimentos por agricultores. Dentro del nuevo paradigma de una agricultura no convencional se busca el uso de fertilizantes y abonos localmente no extraídos, pero fácilmente disponibles y baratos. Bajo este contexto la orina humana es una opción que ha sido reportada como un excelente fertilizante debido a su alto contenido de nutrientes, constituyendo una alternativa de bajo costo y de alta calidad (Richert et al., 2011 y Ranasinghe et al. 2016).

En secciones anteriores se mencionó el contenido de elementos químicos que puede tener la OH y la OHF (Cuadro 1.1), de los diferentes componentes, el nitrógeno, fósforo y potasio son considerados macronutrientes principales para el desarrollo vegetativo, Figura 1.2. Una de las características importantes de la OHF es la presencia de N-P-K en formas biodisponibles³ para la planta; en estudios realizados por Kirchmann y Pettersson (1995), pioneros en utilizar la OHF como fertilizante en experimentos científicos, se detectaron cationes de K y NH₄ y aniones de PO₄. La OH puede ser considerada como una solución nutritiva casi perfecta: el nitrógeno está principalmente en forma de urea, el fósforo como un superfosfato y el potasio se encuentra en forma iónica disponible para las plantas, además la orina contiene micronutrientes de manera equilibrada (Nagy y Zseni, 2017).

La OH y la OHF se ha utilizado en mayor o menor grado en diferentes países y en distintas variedades de cultivo como cereales, verduras y leguminosas; el Cuadro 1.7 está basado en nuestras referencias, se destaca el país y el tipo de cultivo en los cuales se ha experimentado la aplicación de OH y OHF como fuente de nutrientes. Gradualmente, el valor de la fertilización de la orina humana y su uso como fuente de nutrientes han recibido mayor atención entre los investigadores en los últimos tiempos (Karak y Bhattacharyya, 2011).

³La biodisponibilidad es la medida por la cual varias sustancias en el ambiente pueden entrar en los organismos vivos.

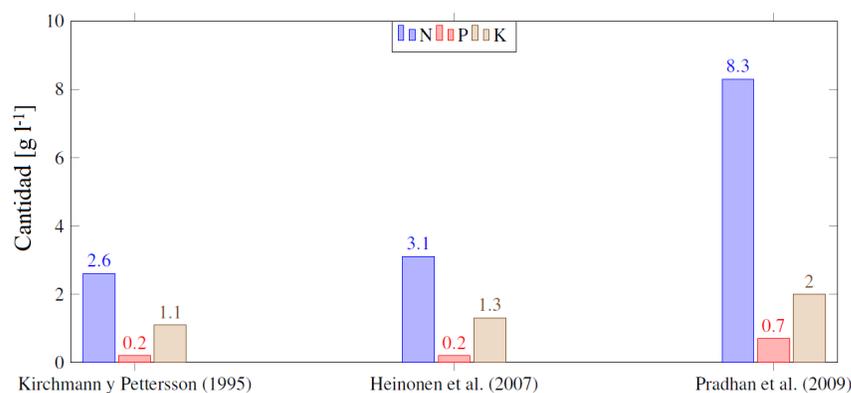


Figura 1.2: Cantidades (en gramos) de N, P y K por litro de OH.

Cuadro 1.7: Estudios donde la orina humana ha sido usada en diferentes cultivos.

| País | Cultivo | Referencia(s) |
|-----------|--------------------|-------------------------------|
| Bolivia | Lechuga | Mamani et al. (2015) |
| Finlandia | Betabel, | Pradhan et al. (2010) |
| | tomate rojo, | Pradhan et al. (2009) |
| | pepinos | Heinonen-Tanski et al. (2007) |
| Ghana | Col | Amoah et al. (2017) |
| Guatemala | Maiz | Reyes (2017) |
| Japón | Espinaca | Sene et al. (2012) |
| México | Chile, | Preciado et al. (2015) |
| | tomate rojo, | Concha (2012) |
| | | Silva (2012) |
| | | Preciado et al. (2010) |
| Nigeria | lechuga | Guadarrama et al. (2002) |
| | Quimbombó | Akpan-Idiok et al. (2012) |
| Sri Lanka | Frijol | Ranasinghe et al. (2016) |
| Sudáfrica | Espinaca, | Mugivhisa y Olowoyo (2017) |
| | | Kutu et al. (2010) |
| | col, | Fatunbi (2009) |
| | maíz, tomate rojo, | Mnkeni et al. (2008) |
| | betabel, zanahoria | |
| Suecia | Cebada | Kirchmann y Pettersson (1995) |

Cultivo de lechuga con OHF

Como parte de nuestra bibliografía contamos con la publicación de Mamani et al. (2015), ellos investigaron el uso de la OHF como fuente de nutrientes en cultivo de lechuga, su objetivo fue evaluar la respuesta del cultivo de lechuga a la aplicación de orina humana fermentada en diferentes tiempos.

Uno de los resultados obtenidos indica que los niveles del factor de estudio correspondiente al tiempo de fermentación, 3, 6 y 12 meses, no produjeron diferencias significativas para cada una de las variables de respuesta; en la experimentación no hubo un efecto de tratamientos. Sin embargo, Mamani et al. comentan lo siguiente:

Los resultados de la OHF, en relación a la presencia del nitrógeno se puede apreciar que, la fermentación durante 6 meses, presentó mayor contenido de nitrógeno total, con 4026 mg l⁻¹. (p. 32)

Cultivo de betabel con OHF

Mnkeni et al. (2008) y Pradhan et al. (2010) son referencias citadas en la bibliografía que desarrollan una investigación sobre el uso de la OHF como fertilizante para betabel. La experimentación que llevan a cabo Mnkeni et al. se desarrolla en un invernadero de la University of Fort Hare Alice en Sudáfrica, el experimento consistió en determinar el rendimiento en peso seco de betabel a diferentes dosis de OHF; además, comparar la tolerancia a la salinidad entre betabel y zanahoria, los resultados muestran una tolerancia al Na y una tendencia en el crecimiento del betabel a dosis de 400 kg N ha⁻¹. Por otra parte, en la experimentación realizada por Pradhan et al., su objetivo fue evaluar el efecto de la fertilización con OH y cenizas sobre el rendimiento y calidad del betabel midiendo los microorganismos, nutrientes y antioxidantes contenidos en la raíz. Uno de los resultados en su investigación fue: las tasas de crecimiento, biomasa total, y biomasa de la raíz, en plantas fertilizadas con fertilizante mineral, cenizas + OH y OH no fueron estadísticamente diferentes ($p > 0.05$). En consecuencia, el uso de OH como fertilizante en betabel puede suplir el fertilizante mineral usado en la investigación.

1.5. Diseño y análisis de experimentos

Abordaremos uno de los temas principales y necesarios para el desarrollo de esta tesis, el diseño y el análisis de experimentos; lo que aquí mostraremos será ocupado más adelante para la correcta planeación, ejecución y análisis de aquellos experimentos que serán la base de nuestra investigación. Por otra parte, se menciona al lector que esta tesis tiene como objetivo implícito ser un precedente didáctico; cada uno de los experimentos que presentemos estarán acompañados de su respectiva planeación, y a modo de guía pueden ser utilizados para la implementación de otras pruebas; similarmente en el análisis de experimentos, aunque en esta sección se darán las bases teóricas, los siguientes apartados detallan de manera específica el análisis de los experimentos realizados.

Definiciones básicas en el diseño de experimentos

El diseño de experimentos es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso por medio de pruebas planeadas adecuadamente, de tal manera que se recopilen datos apropiados que puedan analizarse mediante métodos estadísticos, lo que dará como resultado conclusiones válidas y objetivas (Montgomery, 2001 y Gutiérrez y de la Vara, 2012). Daremos la definición de aquellos conceptos necesarios para la correcta planeación de un experimento, recordemos que, sin importar cual sea nuestro fenómeno de estudio, estamos interesados en investigar aquellas variables que interactúen entre la causa y el efecto.

Experimento

Para nuestros fines, tomaremos la siguiente definición: un experimento es el proceso de seguir un procedimiento bien definido, donde no se conoce el resultado de seguir el procedimiento antes del experimento (Conover, 1999). En general, los experimentos se utilizan para estudiar el funcionamiento de los procesos y sistemas; podemos usualmente visualizar el proceso como una combinación de máquinas, métodos, personas, u otros recursos que transformen alguna entrada en una salida que tiene una o más respuestas observables (Montgomery, 2001).

Unidad experimental

La unidad experimental es la pieza(s) o muestra(s) que se utiliza para generar un valor que sea representativo del resultado del experimento o prueba, y es el primer concepto que se tiene que definir en forma clara y precisa en el diseño del experimento, ya que constituye una parte estructural del fenómeno de estudio.

Variables de respuesta

A través de esta(s) variable(s) se conoce el efecto o los resultados de cada prueba experimental; por lo general, estas variables se denotan con la letra y (Figura 1.3). Al seleccionar la(s) variable(s) de respuesta, el experimentador debe estar seguro de que esta(s) variable(s) realmente proporciona información útil sobre el proceso en estudio. En la mayoría de los casos, el valor de la variable de respuesta será la media o la desviación estándar (o ambas) de la característica medida (Montgomery, 2001).

Factores controlables

Son variables del proceso o características de los materiales experimentales que se pueden fijar en un nivel dado (Figura 1.3). Algunos de éstos son los que usualmente se controlan durante la operación normal del proceso, y se distinguen porque, para cada uno de ellos, existe la manera o el mecanismo para cambiar o manipular su nivel de operación (Gutiérrez y de la Vara, 2012).

Factores no controlables

Son variables o características de materiales y métodos que no se pueden controlar durante el experimento o la operación normal del proceso (Figura 1.3). Un factor que ahora es no controlable puede convertirse en controlable cuando se cuenta con el mecanismo o la tecnología para ello.

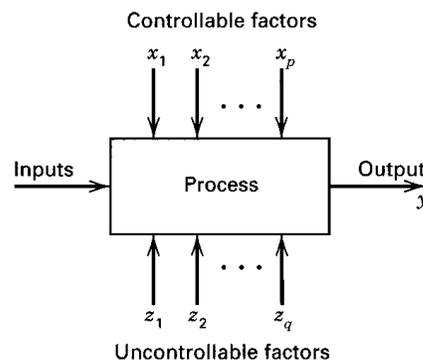


Figura 1.3: Diseño esquemático del modelo general de un proceso o sistema (Montgomery, 2001).

Factores de estudio

Son las variables que se investigan en el experimento, respecto de cómo influyen o afectan a la(s) variable(s) de respuesta y pueden ser de tipo cualitativo, cuantitativo o combinación de ambas. La definición de estos factores tiene que estar ligada con los objetivos e hipótesis de la investigación; además, son uno de los conceptos relevantes que determinarán la selección del diseño experimental. Los factores de estudio pueden ser controlables o no controlables; si el experimentador determina dentro de sus factores de estudio algún factor no controlable, durante el experimento tiene que ser posible controlarlo. Para que un factor pueda ser estudiado es necesario que durante el experimento se haya probado en, al menos, dos niveles.

Niveles y tratamientos

Los diferentes valores que se asignan a cada factor de estudio en un diseño experimental se llaman niveles. Una combinación de niveles de todos los factores de estudio se llama tratamiento o punto de diseño.

Las definiciones de factores de estudio, niveles y tratamientos las podemos presentar de la siguiente manera, si en un diseño experimental se determinan j -factores de estudio, entonces cada factor de estudio tiene asociado un determinado número de niveles, precisamente los valores que el experimentador asigna a cada factor de estudio:

$$\begin{array}{l} \text{factores de estudio :} \\ \text{niveles de cada factor de estudio :} \end{array} \quad \begin{array}{c} \overbrace{f_1} \\ \overbrace{f_2} \\ \dots \\ \overbrace{f_j} \end{array} \quad \begin{array}{c} \overbrace{n_1^{f_1}, n_2^{f_1}, \dots, n_{m_1}^{f_1}} \\ \overbrace{n_1^{f_2}, n_2^{f_2}, \dots, n_{m_2}^{f_2}} \\ \dots \\ \overbrace{n_1^{f_j}, n_2^{f_j}, \dots, n_{m_j}^{f_j}} \end{array},$$

entonces un tratamiento, T , tiene la siguiente forma:

$$T \equiv (n^{f_1}, n^{f_2}, \dots, n^{f_j}),$$

donde $n^{f_1} \in \{n_1^{f_1}, n_2^{f_1}, \dots, n_{m_1}^{f_1}\}$, $n^{f_2} \in \{n_1^{f_2}, n_2^{f_2}, \dots, n_{m_2}^{f_2}\}$, ..., $n^{f_j} \in \{n_1^{f_j}, n_2^{f_j}, \dots, n_{m_j}^{f_j}\}$.

Error aleatorio y error experimental

Siempre que se realiza un estudio experimental, parte de la variabilidad observada en las variables respuesta no se podrá explicar por los factores de estudio, esta variabilidad constituye el llamado error aleatorio. El error aleatorio también absorberá todos los errores que el experimentador comete durante los experimentos, y si éstos son graves, más que error aleatorio hablaremos de error experimental.

Principios básicos en el diseño de experimentos

Para asegurar la validez del análisis, aumentar su sensibilidad y responder las preguntas planteadas, debemos partir de una correcta planeación fundamentada en observar tres principios básicos que son cruciales para cualquier experimento: aleatorización, repetición y bloqueo.

Aleatorización

Consiste en hacer las corridas experimentales al azar y con material también seleccionado aleatoriamente. Basándonos en el principio de aleatorización podemos garantizar la validez de la estimación del error aleatorio, conduciendo a una estimación insesgada de la varianza, así como a una estimación insesgada de las diferencias de tratamiento, es decir, estimaciones que están libres de diferencias sistemáticas debido a variaciones no controladas (Hinkelmann y Kempthorne, 2008).

Repetición

Es correr más de una vez un tratamiento o una combinación de factores. Las repeticiones permiten distinguir mejor qué parte de la variabilidad total de los datos se debe al error aleatorio y cuál a los factores. Cuando no se hacen repeticiones no hay manera de estimar la variabilidad natural o el error aleatorio, y esto dificulta la construcción de estadísticas realistas en el análisis de los datos.

Bloqueo

Consiste en nulificar o tomar en cuenta, en forma adecuada, todos los factores que puedan afectar la respuesta observada. La idea básica es dividir el conjunto total de unidades experimentales en subconjuntos (bloques) que sean lo más homogéneos posible. De este modo, se pueden eliminar los efectos de los factores molestos que contribuyen a la variación sistemática de las diferencias entre las unidades experimentales (Hinkelmann y Kempthorne, 2008).

Clasificación y selección de los diseños experimentales

Existen muchos diseños experimentales para estudiar la gran diversidad de problemas o situaciones que ocurren en la práctica; la selección del diseño experimental está vinculada con la pregunta de investigación, la hipótesis de investigación y los objetivos que tiene el experimentador, cuando alguno de ellos cambia, cambia también el diseño experimental.

Gutiérrez y de la Vara (2012) señalan cinco aspectos que más influyen en la selección de un diseño experimental:

1. El objetivo del experimento.
2. El número de factores a estudiar.
3. El número de niveles que se prueban en cada factor.
4. Los efectos que interesa investigar (relación factores-respuesta).
5. El costo del experimento, tiempo y precisión deseada.

Gutiérrez y de la Vara (2012) toman como criterio general el objetivo del experimento para hacer una clasificación de los diseños experimentales y los otros cuatro puntos para subclasificarlos, Figura 1.4.

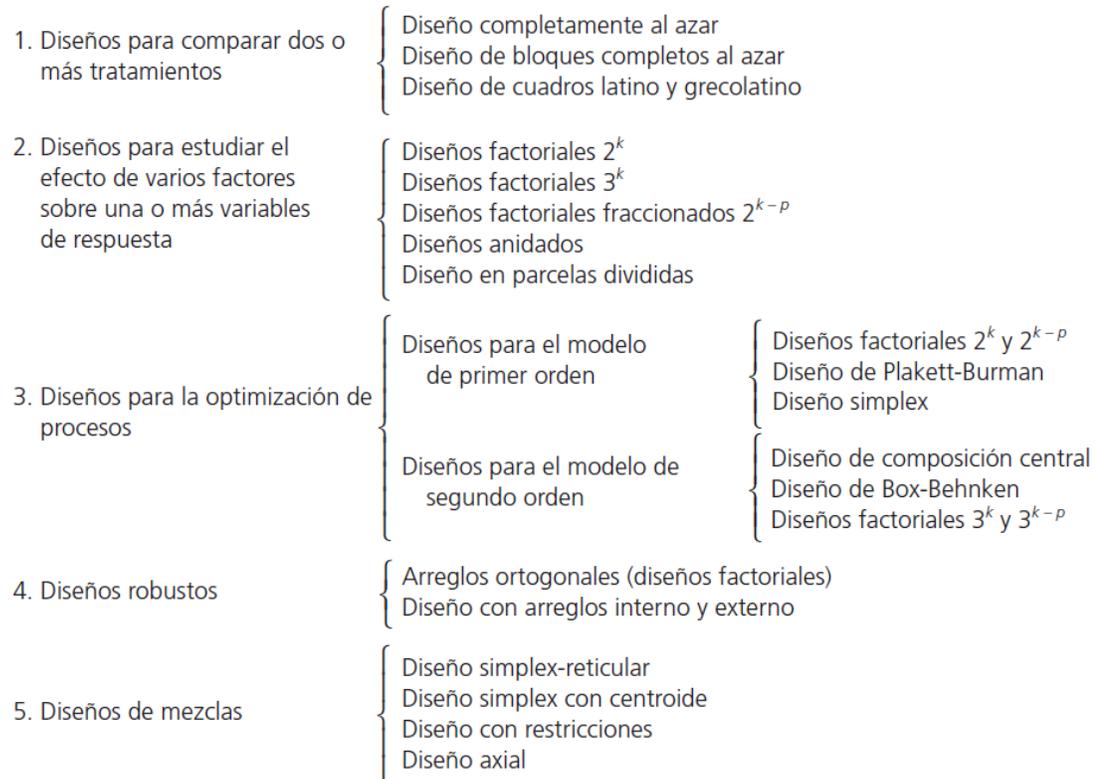


Figura 1.4: Clasificación de los diseños experimentales propuesta por Gutiérrez y de la Vara (2012).

Análisis de la varianza (ANOVA)

El análisis de la varianza, o más brevemente **ANOVA**, se refiere en general a un conjunto de situaciones experimentales y procedimientos estadísticos para el análisis de respuestas cuantitativas de unidades experimentales. La idea general de esta técnica es separar la variación total en las partes con las que contribuye cada fuente de variación en el experimento (Montgomery, 2001). El problema de ANOVA más simple se conoce indistintamente como unifactorial o ANOVA unidireccional e implica el análisis de datos muestreados de dos o más poblaciones numéricas o de datos de experimentos en los cuales se utilizaron más de dos tratamientos.

ANOVA unifactorial

El ANOVA unifactorial se centra en la comparación de más de dos medias de población o tratamiento. Sean

I = el número de poblaciones o el número de tratamientos que se están comparando, y

μ_i = la media poblacional i o la respuesta promedio verdadera al tratamiento i , para $1 \leq i \leq I$.

Las hipótesis pertinentes son:

$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_I$ (hipótesis nula).

$H_1 : \mu_i \neq \mu_j$, para algún $i \neq j$ (hipótesis alternativa).

El objetivo del análisis de la varianza es generar información suficiente que infiera sobre la decisión en el juego de hipótesis H_0 vs H_1 , la estrategia para resolver el problema radica en construir un estadístico de prueba que nos permita aceptar la hipótesis nula o rechazarla a favor de la hipótesis alternativa (Gutiérrez y de la Vara, 2012).

Notación. Se utiliza una letra con dos subíndices para diferenciar las observaciones, el primer subíndice identifica el número de la muestra, correspondiente a la población o al tratamiento que se está muestreando y el segundo denota la posición de la observación dentro de dicha muestra. Sean

X_{ij} = la variable aleatoria que representa el valor de la unidad experimental j sometida al tratamiento i .

x_{ij} = el valor observado de la variable aleatoria X_{ij} cuando se realiza el experimento.

Antes de proceder a construir el estadístico de prueba supondremos que las variables aleatorias, X_{ij} , pertenecientes a cualquier tratamiento son mutuamente independientes y las diferentes poblaciones o tratamientos son independientes entre sí. Para nuestros fines, abordaremos el caso de tamaños de población iguales.

Sea J el número de observaciones en cada muestra. El conjunto de datos se compone de IJ observaciones. Las *medias muestrales individual* serán denotadas por $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_I$.

Es decir:

$$\bar{X}_i = \frac{\sum_{j=1}^J X_{ij}}{J}, \quad i = 1, 2, \dots, I.$$

Asimismo, el promedio de todas las observaciones IJ , llamada *media grande* o *media global*, es:

$$\bar{X}_{..} = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J X_{ij}}{IJ}.$$

Además, sean $S_1^2, S_2^2, \dots, S_I^2$ las *varianzas muestrales*:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^J (X_{ij} - \bar{X}_i)^2}{J-1}, i = 1, 2, \dots, I.$$

Suposiciones. Las I distribuciones de población o tratamiento son normales con la misma varianza σ^2 . Es decir, cada X_{ij} está normalmente distribuida con

$$E(X_{ij}) = \mu_i, \quad V(X_{ij}) = \sigma^2.$$

El estadístico de prueba. Si H_0 es verdadera, las J observaciones en cada muestra provienen de una distribución normal con la misma media μ , en cuyo caso las medias muestrales $\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_I$ deberán ser razonablemente parecidas, donde \bar{x}_i es el valor observado de \bar{X}_i . El procedimiento de prueba se basa en comparar una medida de diferencias entra las \bar{x}_i . (variación “entre muestras”) con una medida de variación calculada desde adentro de cada una de las muestras.

Definición 1.5.1. La *media de los cuadrados del tratamiento*, $MSTr$, esta dada por:

$$MSTr = \frac{J}{I-1} \left[(\bar{X}_1 - \bar{X}_{..})^2 + (\bar{X}_2 - \bar{X}_{..})^2 + \dots + (\bar{X}_I - \bar{X}_{..})^2 \right]$$

y la *media de los cuadrados del error*, MSE , es:

$$MSE = \frac{S_1^2 + \dots + S_I^2}{I},$$

el estadístico de prueba para ANOVA unifactorial es:

$$F = \frac{MSTr}{MSE}.$$

Procedimiento. Sea F el estadístico de prueba en un problema de ANOVA unifactorial que implica I poblaciones o tratamientos con una muestra aleatoria de J observaciones de cada uno. Cuando H_0 es verdadera y las suposiciones planteadas se cumplen, F tiene una disribución F de Snedecor con $\nu_1 = I - 1$ y $\nu_2 = I(J - 1)$ grados de libertad. De esta manera rechazamos H_0 con un nivel de significancia α ($0 < \alpha < 1$) si $f \geq F_{\alpha, I-1, I(J-1)}$, donde f denota el valor del estadístico de prueba F , Figura 1.5.

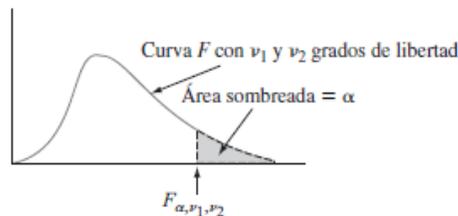


Figura 1.5: La región de rechazo, con un nivel de significancia α , corresponde a valores mayores o iguales a F_{α, ν_1, ν_2} .

Pruebas de comparación múltiple

Cuando el valor del estadístico F en un ANOVA unifactorial no es significativo, el análisis se termina porque no se han indentificado diferencias entre las medias poblacionales de los tratamientos. Pero cuando H_0 es rechazada, el investigador normalmente deseará saber cuáles de las μ_i son diferentes una de otra. Un método para realizar este análisis adicional se llama **procedimiento de comparaciones múltiples**.

Muchos de los procedimientos que se utilizan con más frecuencia están basados en la siguiente idea central. Primero se calcula un intervalo de confianza para cada diferencia $\mu_i - \mu_j$ con $i < j$. Si el intervalo para $\mu_i - \mu_j$ no incluye a 0, se concluye que μ_i y μ_j difieren de manera significativa una de otra; si el intervalo sí incluye a 0, se considera que las dos μ no difieren de manera significativa. Siguiendo la misma línea de razonamiento para cada uno de los demás intervalos, se es capaz de juzgar si cada par de medias difiere o no en forma significativa una de otra.

Procedimiento de Tukey

El procedimiento de Tukey implica utilizar una distribución de probabilidad llamada *distribución de rango estudentizado*.

Para definir el rango estudentizado supongamos k variables aleatorias independientes X_1, X_2, \dots, X_k normalmente distribuidas con media μ y varianza σ^2 , supongamos además que el estimador insesgado de la varianza, S^2 , es independiente de las X_i , se define el rango de este conjunto de variables como:

$$R = \max(X_i) - \min(X_i).$$

Entonces, dadas las condiciones supuestas se define el rango estudentizado:

$$\frac{\max(X_i) - \min(X_i)}{S} = \frac{R}{S}, \text{ el cual es denotado por } Q_{k,v}.$$

La distribución de este estadístico, que depende de k y v siendo los grados de libertad del numerador y denominador, respectivamente, ha sido tabulada y los valores críticos pueden encontrarse en Montgomery (2012) o Gutiérrez y de la Vara (2012).

Denotamos por $Q_{\alpha,k,v}$ el valor crítico α de la distribución de rango estudentizado con k y v grados de libertad. Cuando la hipótesis nula es rechazada podemos usar el siguiente procedimiento para determinar que parejas de medias poblacionales tienden a diferir.

Proposición 1.5.2. Con probabilidad $1 - \alpha$

$$\bar{X}_i - \bar{X}_j - Q_{\alpha,I,I(J-1)}(MSE/J)^{1/2} \leq \mu_i - \mu_j \leq \bar{X}_i - \bar{X}_j + Q_{\alpha,I,I(J-1)}(MSE/J)^{1/2}$$

para cada $i = 1, \dots, I$ y $j = 1, \dots, I$.

Demostración. Consideremos las desviaciones

$$(\bar{X}_1 - \mu_1), (\bar{X}_2 - \mu_2), \dots, (\bar{X}_I - \mu_I),$$

las cuales son variables aleatorias independientes normalmente distribuidas con media 0 y varianza σ^2/J . Además, se prueba que MSE/J es un estimador insesgado de σ^2/J independiente de dichas desviaciones. En consecuencia, de la definición de rango estudentizado, se sigue que:

$$\frac{\max(\bar{X}_i - \mu_i) - \min(\bar{X}_i - \mu_i)}{\left(\frac{MSE}{J}\right)^{1/2}} \sim Q_{I,IJ-I}.$$

Para $\alpha \in (0, 1)$ se cumple la siguiente igualdad:

$$P\left(\frac{\max(\bar{X}_i - \mu_i) - \min(\bar{X}_i - \mu_i)}{\left(\frac{MSE}{J}\right)^{1/2}} \geq Q_{\alpha,I,IJ-I}\right) = \alpha,$$

luego

$$P\left(\frac{\text{máx}(\bar{X}_i - \mu_i) - \text{mín}(\bar{X}_i - \mu_i)}{\left(\frac{MSE}{J}\right)^{1/2}} \leq Q_{\alpha, I, I, J-I}\right) = 1 - \alpha.$$

Ahora, para cada i y j se cumple que:

$$|(\bar{X}_i - \mu_i) - (\bar{X}_j - \mu_j)| \leq \text{máx}(\bar{X}_i - \mu_i) - \text{mín}(\bar{X}_j - \mu_j).$$

Dado que la desigualdad anterior se verifica para todas las parejas μ_i y μ_j , entonces

$$P\left(\left|\frac{(\bar{X}_i - \mu_i) - (\bar{X}_j - \mu_j)}{\left(\frac{MSE}{J}\right)^{1/2}}\right| \leq Q_{\alpha, I, I, J-I}\right) = 1 - \alpha.$$

Por tanto,

$$P\left(\bar{X}_i - \bar{X}_j - Q_{\alpha, I, I, (J-1)}\left(\frac{MSE}{J}\right)^{1/2} \leq \mu_i - \mu_j \leq \bar{X}_i - \bar{X}_j + Q_{\alpha, I, I, (J-1)}\left(\frac{MSE}{J}\right)^{1/2}\right) = 1 - \alpha.$$

□

Cuando las medias de muestra individual \bar{X}_i, \bar{X}_j y el MSE son calculados, el resultado es un conjunto de intervalos de confianza con el nivel de confianza simultáneo $1 - \alpha$ para todas las diferencias de la forma $\mu_i - \mu_j$. Cada intervalo que no incluye 0 da lugar a la conclusión de que los valores correspondientes de μ_i y μ_j difieren significativamente uno de otro.

El método de la diferencia mínima significativa de Fisher

Este procedimiento usa el estadístico F para probar $H_0 : \mu_i = \mu_j$, con estadístico de prueba

$$t_0 = \frac{\bar{X}_i - \bar{X}_j}{\sqrt{MSE\left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j}\right)}}.$$

Suponemos una hipótesis alternativa bilateral, las parejas de medias μ_i y μ_j pueden ser declaradas significativamente diferentes si $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| > t_{\alpha/2, N-a} \sqrt{MSE(1/n_i + 1/n_j)}$. La cantidad:

$$LSD = t_{\alpha/2, N-a} \sqrt{MSE\left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j}\right)}$$

es llamada la diferencia mínima significativa.

Para usar el método de la diferencia mínima significativa comparamos la diferencia observada entre cada par de medias de muestra individual contra la correspondiente cantidad LSD . Si $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| > LSD$, concluimos que las medias poblacionales μ_i y μ_j difieren.

Comparación múltiple mediante el uso de estadística no paramétrica

Los métodos no paramétricos están basados en algunas de las mismas suposiciones sobre las cuales están basados los métodos paramétricos, tal como la suposición que la muestra es aleatoria. Sin embargo, los métodos no paramétricos no asumen una distribución de probabilidad poblacional particular, y por tanto, son válidos para datos que provengan de cualquier población con cualquier distribución de probabilidad, la cual puede ser desconocida. Muchos de los métodos paramétricos están basados en la suposición de normalidad porque las teorías detrás de las pruebas pueden funcionar con la distribución normal poblacional. Sin embargo, datos que contengan valores atípicos, los cuales son observaciones que son mucho más grandes o mucho más pequeñas que la mayoría de las observaciones de la muestra, son buenos ejemplos de tipos de datos sobre los cuales métodos paramétricos fundamentados en la suposición de normalidad pueden tener una reducida potencia comparado con métodos no paramétricos basados en rangos.

La prueba de Kruskal-Wallis

Datos. El conjunto de datos consiste de k muestras aleatorias de posible tamaño diferente. Denotamos la i -ésima muestra aleatoria de tamaño n_i , por $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in_i}$. Entonces los datos pueden ser ordenados en columnas

| <i>Muestra 1</i> | <i>Muestra 2</i> | <i>...</i> | <i>Muestrak</i> |
|------------------|------------------|------------|-----------------|
| $X_{1,1}$ | $X_{2,1}$ | | $X_{k,1}$ |
| $X_{1,2}$ | $X_{2,2}$ | | $X_{k,2}$ |
| \dots | \dots | | \dots |
| X_{1,n_1} | X_{2,n_2} | | X_{k,n_k} |

Denotamos por N el número total de observaciones

$$N = \sum_{i=1}^k n_i.$$

Asignamos rango 1 a la más pequeña del total de N observaciones, rango 2 a la segunda más pequeña y así sucesivamente hasta la más grande de todas las N observaciones, la cual recibe rango N .

$R(X_{ij})$ representa el rango asignado a X_{ij} . Sea R_i la suma de los rangos asignados a la i -ésima muestra.

$$R_i = \sum_{j=1}^{n_i} R(X_{ij}), \quad i = 1, 2, \dots, k.$$

Calculamos R_i para cada muestra.

Si los rangos se pueden asignar de diferentes maneras porque varias observaciones son iguales entre sí, asignamos el rango promedio a cada una de las observaciones vinculadas.

Suposiciones.

1. Todas las muestras son muestras aleatorias de sus respectivas poblaciones.
2. Hay independencia mutua entre las diversas muestras.
3. La escala de medición es al menos ordinal.
4. Las k funciones de distribución poblacional son idénticas, o bien, algunas de las poblaciones tienden a producir valores más altos que otras poblaciones.

Estadístico de prueba. El estadístico de prueba T es definido como:

$$T = \frac{1}{S^2} \left(\sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - \frac{N(N+1)^2}{4} \right), \text{ donde } S^2 = \frac{1}{N-1} \left(\sum_{\substack{\text{todos} \\ \text{los rangos}}} R(X_{ij})^2 - N \frac{(N+1)^2}{4} \right).$$

Si no existen vínculos⁴, S^2 se simplifica a $N(N+1)/12$, y el estadístico de prueba se reduce a:

$$T = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1).$$

Distribución nula. En general, la distribución de T es bastante incómoda para trabajar. Por tanto, la distribución chi-cuadrada con $k-1$ grados de libertad es usada como una aproximación a la distribución nula de T .

Juego de hipótesis.

H_0 : Las k funciones de distribución poblacional son idénticas.

H_1 : Al menos una de la k funciones de distribución poblacional es diferente al resto.

Dado que la prueba de Kruskal-Wallis está diseñada para ser sensible respecto a la diferencia de medias de las k poblaciones, algunas veces la hipótesis alternativa puede ser establecida como sigue:

H_1 : Las k poblaciones no tienen medias idénticas.

Rechazamos H_0 a nivel α si T es más grande que su $1-\alpha$ cuantil respecto de la distribución nula.

Cuando existen vínculos o cuando las tablas exactas no están disponibles, los cuantiles aproximados pueden ser obtenidos de la distribución chi-cuadrada con $k-1$ grados de libertad. Rechazamos H_0 a un nivel α si T excede el $1-\alpha$ cuantil obtenido. El p valor es aproximadamente la probabilidad de una variable aleatoria chi-cuadrada con $k-1$ grados de libertad excediendo el valor observado de T , i.e. $p = P(\chi_{k-1}^2 > T)$.

Comparaciones múltiples. Cuando la hipótesis nula es rechazada podemos usar el siguiente procedimiento para determinar qué parejas de poblaciones tienden a diferir. Podemos decir que las poblaciones i y j parecen ser diferentes, si la siguiente desigualdad es satisfecha:

$$\left| \frac{R_i}{n_i} - \frac{R_j}{n_j} \right| > t_{1-(\alpha/2)} \left(S^2 \frac{N-1-T}{N-k} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)^{1/2},$$

donde $t_{1-(\alpha/2)}$ es el $1-(\alpha/2)$ cuantil de la distribución t con $N-k$ grdos de libertad.

Este procedimiento es repetido para todos los pares de poblaciones. El mismo nivel α es comúnmente usado aquí como en la prueba de Kruskal-Wallis.

La prueba de Friedman

Datos. Los datos consisten de b -bloques mutuamente independientes, cada bloque está conformado por k variables aleatorias $(X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ik})$. La variable aleatoria X_{ij} está en el bloque i y es asociada con el tratamiento j . Los b -bloques son ordenados de la siguiente manera:

| | | | | |
|---------------|-----------|-----------|-----|-----------|
| <i>Bloque</i> | 1 | 2 | ... | k |
| 1 | $X_{1,1}$ | $X_{1,2}$ | ... | $X_{1,k}$ |
| 2 | $X_{2,1}$ | $X_{2,2}$ | ... | $X_{2,k}$ |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| b | $X_{b,1}$ | $X_{b,2}$ | ... | $X_{b,k}$ |

⁴No existen vínculos en las N observaciones si cada $R(X_{ij}) \neq R(X_{kl})$, para $i \neq k$ y $j \neq l$.

Sea $R(X_{ij})$ el rango de 1 a k , asignado a X_{ij} dentro del bloque i . Esto es, para el bloque i las variables aleatorias $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ik}$ son comparadas entre sí y el rango 1 es asignado al valor observado más pequeño, el rango 2 es asignado al segundo valor observado más pequeño y así sucesivamente hasta el rango k , asignado al valor observado más grande en el bloque i . Los rangos son asignados en todos los b -bloques. Se usan rangos promedio en caso de vínculos.

La suma de los rangos respecto a cada tratamiento para obtener R_j :

$$R_j = \sum_{i=1}^b R(X_{ij}), \text{ para } j = 1, 2, \dots, k.$$

Suposiciones.

- Los b -bloques son mutuamente independientes.
- Dentro de cada bloque las observaciones pueden clasificarse de acuerdo con algún criterio de interés.

Estadístico de prueba. El estadístico de prueba T_1 es definido como:

$$T_1 = \frac{12}{bk(k+1)} \sum_{j=1}^k \left(R_j - \frac{b(k+1)}{2} \right)^2.$$

Si existen vínculos presentes es necesario hacer un ajuste. Sea A_1 la suma de los cuadrados de los rangos y rangos promedios:

$$A_1 = \sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^k [R(X_{ij})]^2.$$

También se calcula el factor de corrección C_1 dado por: $C_1 = bk(k+1)^2/4$. Entonces el estadístico T_1 , ajustado por la presencia de vínculos, se convierte en:

$$T_1 = \frac{(k-1) \left[\sum_{j=1}^k R_j^2 - bC_1 \right]}{A_1 - C_1} = \frac{(k-1) \sum_{j=1}^k \left(R_j - \frac{b(k+1)}{2} \right)^2}{A_1 - C_1}.$$

Distribución nula. La distribución exacta de T_1 es difícil de encontrar, por lo cual es frecuente usar una aproximación. La distribución aproximada de T_1 es la chi-cuadrada con $k-1$ grados de libertad.

Juego de hipótesis.

H_0 : Los tratamientos tienen efectos idénticos.

H_1 : Al menos uno de los tratamientos tiende a producir valores observados más grandes.

Rechazamos H_0 con un nivel de significancia α si T_1 excede el $1 - \alpha$ cuantil de la distribución nula.

Comparaciones múltiples. El siguiente método para comparar tratamientos individuales puede ser usado solo si la prueba de Friedman garantiza el rechazo de la hipótesis nula. Los tratamientos i y j son considerados diferentes si la siguiente desigualdad es satisfecha:

$$|R_j - R_i| > t_{1-(\alpha/2)} \left[\frac{2(bA_1 - \sum R_j^2)}{(b-1)(k-1)} \right]^{\frac{1}{2}},$$

donde $t_{1-(\alpha/2)}$ es el $1 - (\alpha/2)$ cuantil de la distribución t con $(b-1)(k-1)$ grados de libertad.

Antecedentes

En 1995 Kluwer Academic Publishers publica, *Human urine-Chemical composition and fertilizer efficiency* (Kirchmann y Pettersson, 1995), la primera investigación científica en ocupar orina humana como fertilizante en plantas comestibles. La investigación está enfocada en la caracterización físico-química de la orina y el cultivo de cebada en macetas utilizando orina humana almacenada por un periodo de 3 meses como fertilizante aportador de nitrógeno y fósforo. Dentro de las conclusiones se tiene una amplia caracterización de los componentes químicos de la orina (Cuadro 1.1); se resalta la medición de las concentraciones de metales pesados hallados (cadmio, cromo, cobalto, cobre, mercurio, níquel, plomo y zinc), por otra parte se concluye que la eficiencia en el uso de la orina como fuente de nitrógeno fue menor que la del nitrato de amonio, debido a las mayores pérdidas de nitrógeno gaseoso de la orina, y la eficiencia de uso del fósforo en orina es mayor que la del fósforo soluble.

La publicación mencionada en el párrafo anterior, da inicio a una nueva línea de investigación donde convergen distintas áreas del conocimiento; echando mano de la Biología, la Agronomía, la Química, las Matemáticas e incluso la Sociología y la Economía, el investigador realiza trabajos multidisciplinarios enfocados en un mayor impacto social-ambiental.

Referente al trabajo realizado en esta tesis tenemos los siguientes antecedentes como referencias principales:

1. Mamani, V., Loza, M., Coronel, L., Sainz, H., Paye, V. y Coronel, F. (2015). **Uso de la orina humana como fertilizante en la producción de lechuga Waldmann Green (*Lactuca sativa* L.)**. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 3(1), 24-38.
2. Sene, M., Hijikata, N., Ushijima, K., y Funamizu, N. (2012). **Adequate human urine application pattern for agriculture**. *International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science*, 2(1), 038-045.
3. Pradhan, S. K., Holopainen, J. K., Weisell, J. y Heinonen-Tanski, H. (2010). **Human Urine and Wood Ash as Plant Nutrients for Red Beet (*Beta vulgaris*) Cultivation: Impacts on Yield Quality**. *Journal of agricultural and food chemistry*, 58, 2034-2039.
4. Mnkeni, P. N. S., Kutu, F. R., Muchaonyerwa, P. y Austin, L. M. (2008). **Evaluation of urine as a source of nutrients for selected vegetables and maize under tunnel house conditions in the Eastern Cape, South Africa**. *Waste Management and Research*, 26, 132-139.

Las anteriores publicaciones son consideradas referencias principales debido a la directa relación que mantienen con el trabajo de tesis, estableciendo precedentes que influyen y sirven como ejemplo además de proporcionar un sustento teórico.

Sin embargo, dentro de la bibliografía se presentan más referencias que ayudaron en diversos aspectos al desarrollo de la tesis.

El primer artículo que mencionamos arriba es una investigación realizada en Bolivia la cual tiene como objetivo evaluar la respuesta del **cultivo de lechuga**, variedad Waldmann Green, a la aplicación de OHF en diferentes tiempos (3, 6 y 12 meses de fermentación). De acuerdo con la publicación, el diseño experimental se puede describir de la siguiente manera: se toman como unidades experimentales las plantas de lechuga; las variables de repuesta son la altura de la planta, el ancho de hoja de la planta, la longitud de hoja de la planta, el número de hojas por planta, el diámetro de raíz por planta y el rendimiento (kg/m²) de cultivo; se toma solo un único factor de estudio: el tiempo de fermentación de la orina humana; y los diferentes niveles del factor de estudio son: 3, 6 y 12 meses; por último los tratamientos efectuados son: sin orina (T-1), aplicación de OH con tres meses de fermentación (T-2), aplicación de OH con seis meses de fermentación (T-3) y aplicación de OH con doce meses de fermentación (T-4),

cada tratamiento se replicó 24 veces ocupando un diseño experimental completamente al azar.

Los resultados que se obtuvieron haciendo el análisis de la varianza para cada una de las variables de repuesta **no muestran una diferencia significativa entre los diferentes tratamientos** (es decir, no hubo efecto de tratamientos) a excepción de la variable de respuesta longitud de hoja; respecto al análisis de la varianza realizado ($p < 0.05$) existe una ligera diferencia significativa entre los distintos tratamientos, posteriormente la prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) muestra que T-1 es el tratamiento que difiere de los demás.

Para finalizar la reseña de esta primera referencia podemos obtener diversas conclusiones de este artículo: como primer punto posiblemente la falta de diferencia significativa entre los tratamientos implementados se deba al uso del sustrato ocupado para el cultivo de lechuga; por otra parte, aunque la orina que se ocupa tiene un excelente aporte de nitrógeno total (440 mg l⁻¹ en orina de 3 meses, 4026 mg l⁻¹ en orina de 6 meses y 313 mg l⁻¹ en orina de 12 meses) la fisiología de la lechuga pudo no responder a los tratamientos debido a la elevada cantidad de sodio ligeramente variable en cada nivel del factor de estudio (3464 mg l⁻¹ en orina de 3 meses, 3656 mg l⁻¹ en orina de 6 meses y 3830 mg l⁻¹ en orina de 12 meses).

Pasando ahora al segundo artículo, *Adequate human urine application pattern for agriculture*, en él se plantea como objetivo la evaluación de cuándo y con qué frecuencia la orina humana debe ser aplicada en el suelo como solución fertilizante. Cabe mencionar la relevancia que tiene esta investigación en la realización de la experimentación presentada en la tesis; de la publicación extraemos la siguiente cita que forma parte de las conclusiones de los investigadores:

A partir de esta investigación, se llegó a la conclusión de que la aplicación de orina en un único momento antes del trasplante de la plántula produjo un bajo crecimiento de **espinacas**, por lo tanto, una baja disponibilidad de fósforo y un alto nivel de nitrógeno lixiviado. Más aun, no aplicar orina antes del trasplante de la plántula y realizar la aplicación de la orina cada dos días después del trasplante mostró un buen crecimiento de la planta, pero también una alta absorción de nitrógeno y fósforo. Después de eso, **la orina humana aplicada con intervalos frecuentes dio una condición relativamente favorable para el crecimiento** de espinaca en una condición de suelo arenoso. Sin embargo, la limitación de fósforo en la orina se manifestó palpable en este trabajo. En consecuencia, la orina utilizada como fertilizante con ceniza de madera y composta podría ser una mejor visión para promover un alto rendimiento de las plantas en el suelo arenoso.

El tercer artículo, *Human Urine and Wood Ash as Plant Nutrients for Red Beet (Beta vulgaris) Cultivation: Impacts on Yield Quality*, es un precedente importante para el trabajo de tesis frente a otras referencias; se realiza una investigación cuantitativa y cualitativa dirigida exclusivamente a cultivo de betabel fertilizado con orina humana fermentada. El objetivo del estudio fue evaluar el efecto de fertilización de la orina humana y ceniza de madera sobre el rendimiento y calidad de betabel midiendo el contenido de microorganismos, nutrientes y antioxidantes (betanina) en las raíces de la planta. Cabe mencionar que el diseño del experimento solo comprende un único factor de estudio, **el tipo de fertilizante aplicado a las plantas de betabel**; este factor de estudio -a diferencia de las demás investigaciones mencionadas en este capítulo- es de tipo cualitativo y los niveles del factor de estudio son: sin fertilizante, fertilizante mineral, orina y ceniza de madera como fertilizante, y orina como fertilizante. Dado que cada uno de los niveles del factor de estudio tiene un aporte diferente de nitrógeno y fósforo por capacidad volumétrica, se fijan las cantidades de N y P (133 kg N ha⁻¹ y 89 kg P ha⁻¹, respectivamente) para todos los niveles del factor de estudio; el objetivo fue no introducir una nueva variable dentro del diseño del experimento. Por último, en lo referente al diseño del experimento, se ocupó un diseño en cuadrado latino.

Citamos parte de las conclusiones que obtuvieron los autores del escrito respecto a su investigación.

En conclusión, este estudio apoya nuestra hipótesis principal; es decir, la cantidad de N aplicado fue similar en todos los tratamientos con fertilizantes y, por lo tanto, la tasa de crecimiento, la biomasa total y la biomasa de la raíz de betabel también fueron similares con todos los tratamientos con fertilizantes y más altas que en la situación no fertilizada. **Este estudio mostró que el fertilizante de orina y ceniza de madera, y el fertilizante de orina podrían producir un 27% y un 10% más de biomasa de raíz de betabel, respectivamente, que la fertilización mineral.** Llegamos a la conclusión de que la orina humana, con o sin cenizas, podría utilizarse como fertilizante para el cultivo de betabel y producir una cantidad similar o incluso mayor de biomasa. Se pueden esperar resultados similares en plantas de otras especies de la misma familia. Se necesita más investigación para aclarar cómo los diferentes contenidos de nutrientes de la orina y la ceniza pueden mejorar el cultivo de valiosas plantas comestibles.

En la última referencia, *Evaluation of urine as a source of nutrients for selected vegetables and maize under tunnel house conditions in the Eastern Cape, South Africa*, se investiga la tolerancia a la salinidad y la respuesta a la fertilización con orina de cuatro tipos diferentes de cultivo (maíz, jitomate, betabel y zanahoria). Destacando la experimentación dirigida al cultivo de betabel; debido a la cercanía que tiene con el trabajo de tesis, podemos mencionar lo siguiente: en el diseño experimental se toman como variables de respuesta el peso seco de hoja, el peso seco de la raíz, el nitrógeno residual en suelo, el pH residual en suelo y la conductividad eléctrica residual en suelo; se considera un único factor de estudio, la cantidad de orina por aplicar a las plantas de betabel cultivadas en maceta dentro de un invernadero, y los niveles del factor de estudio son: 0 kg N ha⁻¹, 50 kg N ha⁻¹, 100 kg N ha⁻¹, 200 kg N ha⁻¹, 400 kg N ha⁻¹ y 800 kg N ha⁻¹. Dado que solo existe un único factor de estudio, los niveles de dicho factor pasan a ser los tratamientos. Se realizaron seis repeticiones por tratamiento y se ocupó el diseño experimental por bloque completamente al azar. Los resultados referentes a la experimentación con betabel, expuestos en el artículo, muestran una diferencia significativa ($p < 0.05$) entre los tratamientos respecto a las variables de respuesta: peso seco de hoja y peso seco de raíz. Un aspecto trascendente en la investigación es **la no proporcionalidad del crecimiento de la planta de betabel en relación con la cantidad de orina aplicada**, es decir, se determina que la mejor cantidad de orina humana aplicada como fertilizante en betabel es aquella con aporte equivalente a 400 kg N ha⁻¹; el tratamiento que equivale a aplicar 800 kg N ha⁻¹ de orina tuvo un menor rendimiento en peso seco de hoja y de raíz, además de un elevado índice de conductividad eléctrica residual (4.6 mS cm⁻¹), lo cual refleja una posible saturación de sodio en la planta causando un estrés hídrico y en consecuencia un deterioro en los procesos fisiológicos que dan como resultado un bajo peso.

Por último, citamos parte de las conclusiones obtenidas por Mnkeni et al.:

Los resultados de este estudio han confirmado evidencias anteriores disponibles en la literatura de que **la orina humana es tan efectiva como los fertilizantes de urea o amonio** como fuente de nitrógeno para los cultivos.

Sin embargo, el uso de altas tasas de orina humana dio como resultado la salinización del suelo y una alta acumulación de sodio en los tejidos de las plantas, lo que sugiere que **el uso de la orina humana no debe considerarse para cultivos sensibles a la sal** como la zanahoria y para los suelos que se sabe tienen problemas de salinidad. Además, el estado de salinidad de los suelos que son regularmente fertilizados con orina debe ser monitoreado para evitar la acumulación de sal.

Sin embargo, si las pruebas patógenas demuestran un bajo riesgo de transmisión de enfermedad, se debe promover el uso de la orina humana en la fertilización de cultivos en áreas donde el uso de inodoros secos de desviación de orina permita su recolección segura.

Justificación

En relación a lo mencionado en los capítulos anteriores, si buscamos dar solución a las preguntas planteadas, existen actividades con características muy particulares que pueden generar respuestas parciales, la complejidad del fenómeno que se está estudiando requiere la participación de distintas áreas del conocimiento; resolver el problema a través de una perspectiva solo podrá brindarnos una respuesta parcial. En el presente trabajo y dadas sus condiciones inherentes optaremos por una perspectiva que esté relacionada con el diseño y el análisis de experimentos, donde las actividades particulares que puedan generar respuestas parciales son aquellas que realice el matemático adoptando una postura más activa sobre la investigación aplicada, en otras palabras aquello que se persigue es atacar el problema de investigación mediante el conocimiento matemático, cumpliendo aquellos objetivos que puedan dar una respuesta a las hipótesis que se plantearán. En consecuencia, la dirección que daremos a la tesis declinará seguir una dirección similar a la mayoría de las referencias bibliográficas, nuestro aporte consistirá en resaltar aquellos principios que inciden en el diseño y análisis de un experimento.

El generar conocimiento a través de la experimentación-aplicación permite desarrollar en el individuo la capacidad de adquirir conocimiento interdisciplinario, además una mejor aptitud perceptiva y proactiva (Gutiérrez y de la Vara, 2012), con lo cual tenemos un argumento epistemológico que fundamenta el interés hacia las Matemáticas aplicadas.

Una parte importante de la presente investigación se refleja en el manejo adecuado de la OH y su posterior uso en el cultivo de lechuga y betabel para efectuar experimentaciones que puedan fundamentar las bases de nuevas metodologías aplicables a la agricultura. Investigaciones similares como las presentadas en el Cuadro 1.7 apuntan a líneas de investigación que tienen por objetivo transformar los modelos agrícolas en procesos sostenibles que permitan a una sociedad alcanzar autonomía alimentaria.

Cabe mencionar que el adecuado manejo y uso de la orina permite la creación de sistemas de producción sustentables que impactan en beneficio del medio ambiente, respecto a esto Maurer et al. (2003) comenta lo siguiente:

El análisis de diferentes técnicas de eliminación y recuperación de nutrientes en la orina muestra que en muchos casos la recuperación es energéticamente más eficiente que la eliminación y la nueva producción de recursos naturales. (p.37)

Por otra parte, el valor que conlleva el uso de la OH como fertilizante viable en algunos cultivos, como los propuestos de betabel y lechuga, se adquiere mediante investigación novedosa, de interés, de frontera y alto impacto. En 1995 se realizaron los primeros estudios científicos sobre el uso de la OH como fuente de nutrientes para cultivo, y a consideración de varios investigadores en el tema, es necesario seguir investigando más a fondo sobre todas las opciones posibles. Respecto a lo anterior se cuenta con los siguientes comentarios:

El uso de la OH en la agricultura tiene muchas ventajas, pero para el uso extendido de la orina como fertilizante en el futuro, sería importante encontrar el mejor método y el costo efectivo de cómo concentrar los diferentes nutrientes en la orina y cómo reducir el volumen de orina. (Nagy y Zseni, 2017, p.497).

Se recomienda además que se investiguen más los efectos sobre la salud del Pb y el Cd en los tallos y Cd, Ni y Hg en las hojas cosechadas del suelo tratado con orina que estaban presentes en las concentraciones más altas en comparación con los tallos y las hojas cosechadas de otras enmiendas.

(Mugivhisa y Olowoyo, 2017, p.140).

Se necesita más investigación para aclarar cómo los diferentes contenidos de nutrientes de la orina y la ceniza pueden mejorar el cultivo de valiosas plantas de cultivo.

(Pradhan, et al., 2010, p.2038).

... la orina como fertilizante no está muy bien investigada científicamente y se necesita compilar más experiencia.

(Maurer, et al., 2003, p.44).

No hay literatura disponible sobre el uso de la orina humana como fertilizante, solo en la orina humana en combinación con las heces...

La cuestión de si el uso de orina humana en tierras agrícolas es adecuado es una de las preguntas clave.

(Kirchmann y Pettersson, 1995, p.149).

Existe un alcance en torno al uso de la orina como fertilizante; el uso de la orina como fuente de nutrientes para el desarrollo de planas está limitado a especies tolerantes al sodio, en consecuencia la fertilización con orina no es viable para todo tipo de cultivo; sin embargo, para aquellas especies que toleran la salinidad se han reportado excelentes rendimientos en cosecha. Mnkeni, et al., (2008) menciona lo siguiente:

El uso de altas porciones de orina humana resultó en salinización del suelo y una alta acumulación de sodio en los tejidos vegetales, sugiriendo que el uso de orina humana no debería ser considerado para cultivos sensibles a la sal como la zanahoria y para suelos que tienen problemas de salinidad. Además, se debe controlar el estado de salinidad de los suelos que se fertilizan regularmente con orina para evitar la acumulación de sal. Donde la orina se usa para la fertilización, el betabel u otras halófilas comestibles como la *Salicornia europaea* podrían incorporarse al sistema agrícola mediante rotación de cultivos como una forma de minimizar la posibilidad de acumulación de sal. (p.139)

Objetivos

Objetivo general

Mediante la teoría de diseño de experimentos, el análisis de la varianza y pruebas de comparación múltiple; tenemos por objetivo **determinar el nivel óptimo de fertilización con orina humana fermentada en cultivos de lechuga (variedad waldman green) y betabel (variedad red pack).**

Objetivos particulares

1. *Diseñar el experimento* de cultivo de lechuga⁵ en macetas de 6 litros dentro de un invernadero, fertilizándolas con cantidades equivalentes a 0, 66, 132 y 198 kg N ha⁻¹ de orina humana fermentada⁶ aplicada en diferentes estratos de tiempo: inmediatamente después del trasplante de la plántula a la maceta, 15 días después del trasplante de la plántula y 30 días después del trasplante de la plántula.
Para el diseño del experimento considerar cuáles serían las unidades experimentales, variables de respuesta, factor(es) de estudio, factores controlables, factores no controlables, niveles y tratamientos.
2. *Ejecutar el experimento* planteado en 1, dando seguimiento al cultivo de lechuga a través de los cuidados que demanden las plantas: riego, deshierbe, aclareo, detección y control de posibles enfermedades y/o parásitos; observar (si es posible) las variables de respuesta durante el proceso experimental; al finalizar el experimento medir las variables de respuesta y hacer las anotaciones pertinentes.
3. *Interpretar los resultados* obtenidos de la experimentación en lechuga mediante un análisis detallado de lo que ha pasado en el experimento a través de: ver los factores y efectos que influyen de manera significativa en las diferentes variables de respuesta detectando a simple vista las principales tendencias y realizando el análisis estadístico (principalmente el análisis de varianza dependiendo del diseño experimental que se haya elegido); señalar los factores que no tuvieron un impacto considerable, interpretar con detalle los efectos más significativos para cada variable de respuesta, encontrar el tratamiento óptimo, verificar los supuestos del modelo y determinar cuál es la respuesta esperada en el mejor tratamiento.
4. *Diseñar el experimento* de cultivo de betabel⁷ en macetas de 6 litros dentro de un invernadero, fertilizándolos con cantidades equivalentes a 0, 30, 60, 120 y 240 kg N ha⁻¹ de orina humana fermentada⁸ aplicada en diferentes estratos de tiempo: inmediatamente después del trasplante de la plántula a la maceta, 15 días después del trasplante de la plántula y 30 días después del trasplante de la plántula.
Para el diseño del experimento considerar cuáles serían las unidades experimentales, variables de respuesta, factor(es) de estudio, factores controlables, factores no controlables, niveles y tratamientos.
5. *Ejecutar el experimento* planteado en 4, dando seguimiento al cultivo de betabel a través de los cuidados que demanden las plantas: riego, deshierbe, aclareo, detección y control de posibles enfermedades y/o parásitos; observar (si es posible) las variables de respuesta durante el proceso experimental; al finalizar el experimento medir las variables de respuesta y hacer las anotaciones pertinentes.

⁵Variedad waldman green

⁶La orina se obtendrá de un único mingitorio donde es almacenada en estado anaeróbico a temperatura ambiente por un periodo mayor a 6 meses, Sección 2.1

⁷Variedad red pack

⁸Las especificaciones de la orina se encuentran en la Sección 2.1

6. *Interpretar los resultados* obtenidos de la experimentación en betabel mediante un análisis detallado de lo que ha pasado en el experimento a través de: ver los factores y efectos que influyen de manera significativa en las diferentes variables de respuesta detectando a simple vista las principales tendencias y realizando el análisis estadístico (principalmente el análisis de varianza dependiendo del diseño experimental que se haya elegido); señalar los factores que no tuvieron un impacto considerable, interpretar con detalle los efectos más significativos para cada variable de respuesta, encontrar el tratamiento óptimo, verificar los supuestos del modelo y determinar cuál es la respuesta esperada en el mejor tratamiento.

Hipótesis

La orina humana obtenida de un mingitorio familiar (localizado en San Bernardino Tepenene, Puebla) y fermentada en estado anaeróbico a temperatura ambiente por un periodo mayor a 6 meses **es un líquido higiénico** que en concentraciones de 0, 66, 132, 198 y 0, 30, 60, 120, 240 kg N ha⁻¹ **estimula en forma diferente el desarrollo vegetativo de lechuga** (*Lactuca sativa*, variedad waldman green) y **de betabel** (*Beta bulgaris*, variedad red pack), respectivamente, cultivados en macetas ocupando tierra de cultivo como sustrato.

Así, mediante al análisis de la varianza y las pruebas de comparación múltiple, suponemos que es posible determinar la concentración que dé mejores rendimientos para cada cultivo.

Capítulo 2

Metodología de los experimentos iniciales

En este capítulo se exponen los primeros experimentos llevados a cabo y se describen los métodos y herramientas empleados para su realización. Según Gutiérrez y de la Vara (2012) y Montgomery (2001) el diseño experimental consta de 5 etapas, a saber, planeación, realización o ejecución, análisis, interpretación y conclusiones. Lo que expondremos a continuación está dirigido a cubrir las dos primeras etapas del diseño y al mismo tiempo satisfacer los objetivos 1, 2, 4 y 5 planteados en la Sección 1.5.

2.1. Metodología para la orina

Recolección y almacenamiento

La orina humana utilizada para la experimentación fue captada de un UDDT familiar localizado en la comunidad de San Bernardino Tepenene, Puebla (18.879420 N, -98.095654 W). La construcción del UDDT fue llevada a cabo por miembros de dicha familia y el cuerpo académico 321-De Investigación en Biodiversidad, Alimentación y Cambio Climático, perteneciente al Instituto de Ciencias de la BUAP, con el objetivo de realizar investigaciones en el tratamiento, manejo y uso de deyecciones humanas en agricultura (Figura 2.1). La orina fue almacenada por un periodo mayor a 6 meses en un recipiente sellado de polietileno con capacidad de 20 l, el recipiente que almacenaba la orina fue guardado durante el periodo señalado a temperatura ambiente (20.6 ± 2.6 °C) en un cuarto aislado y oscuro.



Figura 2.1: UDDT en Tepenene, Puebla. De izq. a derecha: vista frontal del UDDT, Sr. Daniel Mata Camargo participante en la construcción y uso; mingitorio; depósitos separados para el almacenamiento de deyecciones y bidones con orina.

Caracterización

La caracterización físico-química de la orina se realizó con base en las normas mexicanas específicas para cada parámetro. Los análisis fueron llevados a cabo en el Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas de la BUAP (DICA). Las mediciones de los parámetros mostrados en el Cuadro 2.1 fueron realizadas por considerarse las más importantes para efecto del presente trabajo, además de ser citados en la literatura consultada.

También se llevó a cabo un análisis microbiológico con el objetivo de determinar microorganismos patógenos que puedan validar o refutar la hipótesis establecida, donde se señaló que la orina humana, después del debido tratamiento, es un líquido higiénico factible para ser utilizado como fuente de nutrientes en el cultivo de determinadas plantas. Los estudios fueron hechos en la Facultad de Ciencias Químicas de la BUAP (FCQ) a cargo de los tesisistas: Alejandro Flores Grijalva, Patricia García Carmona y Sandra Cortes Domínguez pertenecientes a la Licenciatura de Químico Farmacobiología.

El Cuadro 2.1 muestra los parámetros físico-químicos y microbiológicos que fueron analizados en la orina ocupada para las experimentaciones, cada parámetro se encuentra ligado al método utilizado para su determinación.

Cuadro 2.1: Parámetros determinados en la OH bajo su respectiva metodología.

| Parámetro | Método |
|--------------------------------------|--------------------|
| pH | NMX-AA-008 |
| Conductividad eléctrica | Conductímetro |
| Calcio (Ca^{2+}) | Método EDTA |
| Magnesio (Mg^{2+}) | Método EDTA |
| Sodio (Na^{1+}) | Flamometría |
| Potasio (K^{1+}) | Flamometría |
| N-total | NMXAA026-SCFI-2010 |
| Sulfatos (SO_4^{-2}) | NMX-AA-074 |
| Fosfatos (PO_4^{-3}) | NMX-AA-029 |
| Carbonatos (CO_3^{-2}) | Volumetría |
| Bicarbonatos (HCO_3^{-1}) | Volumetría |
| Cloruros (Cl^{-1}) | NMX-AA-073 |
| Fe | AA |
| Cu | AA |
| Mn | AA |
| Zn | AA |
| Coliformes | NOM 112-SSA1-1994 |
| Bacterias mesofílicas aerobias | NOM 092-SSA1-1994 |
| Samonella | NOM 114-SSA1-1994 |
| Mohos y levaduras | NOM 111-SSA1-1994 |

2.2. Metodología para el sustrato

Los resultados derivados de este trabajo de investigación se pretenden tomar como base para su posterior aplicación *in situ* a pequeña escala y posiblemente después de manera extensiva, esta es la razón fundamental por la cual el sustrato ocupado para las experimentaciones fue tierra extraída de suelo de cultivo de un huerto familiar (19.060144 N, -98.132751W). La tierra extraída fue llevada al invernadero donde se harían las experimentaciones. Su preparación para su posterior manipulación fue de la siguiente manera: se depositó en una superficie previamente limpia y por medio de una pala fue movida de manera constante para homogeneizarla, a la par del ejercicio de homogeneización se agregaba agua a través del riego de una manguera hasta obtener un 60 % de humedad en la tierra. Al finalizar se cubrió con una lona para posteriormente ser ocupada en la formación de las unidades experi-

mentales (Sección 2.4). Se resalta que cada herramienta ocupada para la manipulación del sustrato fue previamente limpiada; con la finalidad de no generar un vector de contaminación para las plantas e interferencia en los análisis microbiológicos.

Caracterización

Cabe resaltar, para la realización de este trabajo de tesis, la participación de varios colaboradores y compañeros de universidad, respecto al sustrato ocupado (tierra extraída de un huerto familiar), la toma de muestra y el análisis edafológico fue llevado a cabo a través del Programa de Servicio Social 63267 de la BUAP, realizado por las compañeras Padilla Villavicencio Montserrat y De La Luz Ramos Andrea, alumnas egresadas de la Facultad de Ingeniería Química de la BUAP. El sustrato ocupado en la experimentación fue sometido a un análisis microbiológico para la detección y cuantificación de posibles patógenos. El Cuadro 2.2 muestra los parámetros analizados y su respectiva metodología. Los estudios se realizaron en la FCQ a cargo de la Dra. Reina Almiray Pinzón. A continuación mostramos el en la cual destacamos los parámetros analizados

Cuadro 2.2: Parámetros determinados en el sustrato bajo su respectiva metodología.

| Parámetro | Método |
|------------------------------------|-----------------------|
| pH | NOM-021-SEMARNAT-2000 |
| Densidad aparente | NOM-021-SEMARNAT-2000 |
| Porcentaje de saturación | NOM-021-SEMARNAT-2000 |
| Capacidad de intercambio catiónico | NOM-021-SEMARNAT-2000 |
| Acidez extraíble | NOM-021-SEMARNAT-2000 |
| Cloruros | NOM-021-SEMARNAT-2000 |
| Calcio | NOM-021-SEMARNAT-2000 |
| Coliformes | NOM 112-SSA1-1994 |
| BMA | NOM 092-SSA1-1994 |
| Samonella | NOM 114-SSA1-1994 |
| Mohos y levaduras | NOM 111-SSA1-1994 |

2.3. Metodología para la planta

Para dar inicio a cada una de las pruebas se determinó adquirir plántulas de lechuga y betabel, respectivamente. Las plántulas fueron adquiridas de manera comercial (19.010711 N, -98.212333 W). En las experimentaciones efectuadas por Mamami et al. (2015), Pradhan et al. (2010) y Mnkeni et al. (2008), inician con la germinación de las semillas y dan de dos a tres semanas para aplicar los respectivos tratamientos, durante este periodo, la plántula, en algunos casos, es nutrida con fertilizante para tener un mejor vigor y desarrollo radicular, transcurrido el lapso de tiempo que va de germinación a plántula se aplica la primera cantidad de orina; el día en el cual se realiza la primera dosis lo consideran como el día cero del experimento o el día inicial de la ejecución de las pruebas.

A diferencia de las experimentaciones realizadas por los autores antes mencionados, en nuestro diseño experimental se adquirieron las plántulas de lechuga y betabel con dos semanas posteriores a la germinación; la decisión fue motivada por los siguientes argumentos:

Primero, se busca que cada una de las pruebas experimentales estén, en lo mayor posible, ligadas a las actividades agrícolas practicadas en el estado de Puebla; para las distintas modalidades de cultivo de lechuga los agricultores adquieren los almácigos de lechuga y proceden a cultivarlas, por otra parte para el cultivo de betabel existe una coyuntura entre agricultores que germinan su semilla en suelo y otros que adquieren almácigos.

A diferencia de la germinación de las semillas en las macetas, en las cuales puede ocurrir que algunas no germinen, comenzar la experimentación con las plántulas listas permite una mayor facilidad y factibilidad para iniciar el experimento.

Por último, cada una de las plántulas germinadas en almácigo tienen un mejor desarrollo radicular, permitiendo un menor estrés al trasplante y una mayor tolerancia a los tratamientos.

Para el primer experimento fue comprado un almácigo con 100 plántulas de lechuga (variedad waldman green), teniendo dos semanas de germinación, para el segundo experimento fue comprado un almácigo con 100 plántulas de betabel (variedad red pack), teniendo dos semanas de germinación.

Caracterización microbiológica

Se efectuaron análisis microbiológicos con el objetivo de determinar factores que pudieran influir en los resultados de los experimentos, es decir, la existencia de microorganismos que incidieran en la posible inocuidad de la orina. Los estudios microbiológicos se realizaron en la FCQ a cargo de la Dra. Reina Almiray Pinzón.

Cuadro 2.3: Parámetros determinados en las plántulas de lechuga y betabel bajo su respectivo método.

| Parámetro | Método |
|-------------------|-------------------|
| Coliformes | NOM 112-SSA1-1994 |
| BMA | NOM 092-SSA1-1994 |
| Samonella | NOM 114-SSA1-1994 |
| Mohos y levaduras | NOM 111-SSA1-1994 |

2.4. Metodología de las experimentaciones

Lugar de experimentación

El lugar utilizado para realizar los experimentos fue un invernadero ubicado dentro de las instalaciones de la BUAP (19.006559N, -98.206444W). Con dimensiones de 8 m de largo por 3 de ancho, cuenta con dos soportes de concreto de dimensiones 0.8 m de ancho por 7 m de largo, separados por un pasillo de un metro de ancho.

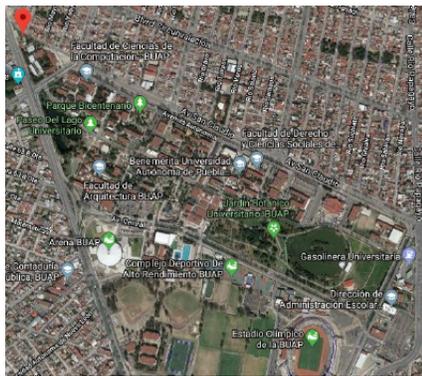


Figura 2.2: Localización del invernadero en CU.



Figura 2.3: Invernadero.

Planeación de los experimentos

Bajo el objetivo de obtener una correcta planeación de los experimentos, nos guiamos a través de los principios básicos del diseño experimental: aleatorización, repetición y bloqueo, buscando que los datos obtenidos sean representativos de los experimentos ejecutados y útiles para probar las hipótesis planteadas. Para describir de la mejor manera la planeación de cada uno de los experimentos usaremos de guía el texto de los autores Gutiérrez y de la Vara (2012).

Mediante la introducción, los antecedentes y la justificación hemos conseguido sustentar de manera teórica el problema de estudio; a su vez, los objetivos, la hipótesis y la introducción nos han servido también para delimitarlo y entenderlo, en consecuencia ha quedado claro qué se va a estudiar, por qué es importante y cuál es el alcance del estudio. Aclarado lo anterior nos proponemos pasar al siguiente paso, la experimentación.

Resumiremos a continuación cual será el proceder: se describirá de manera sucinta y general en qué consistió cada uno de los experimentos realizados, posteriormente al definir los conceptos que se involucraron en el diseño experimental la descripción de los experimentos quedará clara y explícita; lo primero que debemos conocer (en cualquier diseño experimental) son las unidades experimentales, una vez definidas para cada uno de los experimentos, redactaremos cuales fueron nuestras variables de respuesta para cada experimento, a continuación mencionamos cuales fueron los factores de estudio, finalizando con los niveles, tratamientos y selección del diseño experimental.

Se llevaron a cabo dos experimentos:

1. **El primer experimento consistió en** aplicar orina humana fermentada (Sección 2.1) en diferentes estratos de tiempo y en concentraciones de 0, 66, 132 y 198 kg N ha⁻¹ a plantas de lechuga (variedad waldman green), cultivadas en macetas (ocupando el sustrato de la Sección 2.2) dentro de un invernadero de la BUAP durante el 1 de julio al 30 de agosto de 2016.
2. **El segundo experimento consistió en** aplicar orina humana fermentada (Sección 2.1) en diferentes estratos de tiempo y en concentraciones de 0, 30, 60, 120 y 240 kg N ha⁻¹ a plantas de betabel (variedad red pack) cultivadas en macetas (ocupando el sustrato de la Sección 2.2) dentro de un invernadero de la BUAP durante el 23 de septiembre al 5 de diciembre de 2016.

Para especificar de manera puntual en qué consistieron los experimentos definimos los siguientes conceptos.

Unidad experimental

En el diseño del primer experimento se consideró como unidad experimental el objeto constituido por: la planta de lechuga, el sustrato y la maceta; así mismo, en el diseño del segundo experimento se tomó como unidad experimental el objeto constituido por: la planta de betabel, el sustrato y la maceta. Es decir, en ambos experimentos la unidad experimental es el objeto constituido por: la planta (lechuga ó betabel, respectivamente), el sustrato ocupado para el cultivo de la planta y la maceta que contiene a los dos primeros, Figura 2.4.

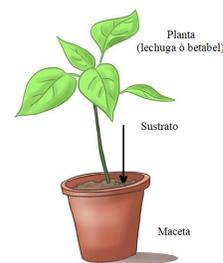


Figura 2.4: Unidad experimental.

Variable(s) de respuesta

Las variables de respuesta elegidas son de tipo cuantitativas; son las que mejor reflejan y caracterizan el objeto de estudio; además, se tiene la certeza que las mediciones obtenidas sobre las variables de respuesta son confiables.

En el diseño del primer experimento consideramos las siguientes variables de respuesta¹:

- Ancho de hoja de la planta.
- Altura de hoja de la planta.
- Peso de la planta.

Por otra parte, en el diseño del segundo experimento consideramos la siguiente variable de respuesta²:

- Peso de la planta.

Factor(es) de estudio

Se propuso solamente un único factor de estudio³ para cada diseño experimental. En ambos experimentos el factor de estudio fue **la cantidad de OHF** colocada a cada una de las unidades experimentales.

Niveles del factor de estudio

Dado que el factor de estudio en ambos experimentos es de tipo cuantitativo, entonces los niveles, que son precisamente los valores que puede tomar el factor de estudio, también son del mismo tipo. Determinamos expresar los niveles del factor de estudio en kilogramos de nitrógeno por hectárea (kg N ha^{-1}) por ser una unidad de medición estándar en aporte de nitrógeno a algún cultivo, frecuente en publicaciones agronómicas, además de proporcionar características de objetividad y replicación en ambos experimentos.

En el diseño experimental que está relacionado con plantas de lechuga se propusieron los siguientes niveles del factor de estudio⁴:

- 0 kg N ha^{-1} (equivalente a 0 lts de OHF o a 0 g N).
- 66 kg N ha^{-1} (equivalente a 0.0923 lts de OHF o a 0.404 g N).
- 132 kg N ha^{-1} (equivalente a 0.1847 lts de OHF o a 0.808 g N).
- 198 kg N ha^{-1} (equivalente a 0.2776 lts de OHF o a 1.215 g N).

En el diseño experimental que está relacionado con plantas de betabel se propusieron los siguientes niveles del factor de estudio⁵:

- 0 kg N ha^{-1} (equivalente a 0 lts de OHF o a 0 g N).
- 30 kg N ha^{-1} (equivalente a 0.0415 lts de OHF o a 0.181 g N).
- 60 kg N ha^{-1} (equivalente a 0.0831 lts de OHF o a 0.363 g N).
- 120 kg N ha^{-1} (equivalente a 0.1663 lts de OHF o a 0.727 g N).
- 240 kg N ha^{-1} (equivalente a 0.3327 lts de OHF o a 1.456 g N).

¹La investigación realizada por Mamani et al. (2015) es un precedente que nos sirve de guía para tomar estas variables de respuesta.

²Las publicaciones de Pradhan et al. (2010) y Mnkeni et al. (2008) son precedentes que nos sirven de referencia para considerar solo una variable de respuesta en la experimentación con betabel.

³Concha (2012), Alvarez (2011) y Mnkeni et al. (2008) son referencias que fundamentan y justifican la elección de un único factor de estudio, así como el tipo de factor de estudio.

⁴Los niveles propuestos emulan los niveles en las investigaciones de Mamani et al. (2015) y Guadarrama et al. (2002).

⁵Los niveles propuestos emulan los niveles en las investigaciones de Mnkeni et al. (2008) y Pradhan et al. (2010).

Tratamientos

Recordemos que los tratamientos en un diseño experimental se definen como combinaciones de los niveles de los factores de estudio (Gutiérrez y de la Vara, 2012); dado que en ambos experimentos solo consideramos un único factor de estudio, en consecuencia los niveles del factor de estudio pasan a ser los tratamientos para cada diseño experimental, respectivamente.

En el primer experimento, aquel relacionado con lechuga, los tratamientos aplicados fueron:

- L1* : Se agregó 0 kg N ha⁻¹ de OHF a la unidad experimental a los 0, 15 y 30 días después del transplante.
- L2* : Se agregó 66 kg N ha⁻¹ de OHF a la unidad experimental dividido equitativamente en tres estratos de tiempo, a los 0, 15 y 30 días después del transplante⁶(equivalente a 0.0307 l de OHF por aplicación).
- L3* : Se agregó 132 kg N ha⁻¹ de OHF a la unidad experimental dividido equitativamente en tres estratos de tiempo, a los 0, 15 y 30 días después del transplante (equivalente a 0.0615 l de OHF por aplicación).
- L4* : Se agregó 198 kg N ha⁻¹ de OHF a la unidad experimental dividido equitativamente en tres estratos de tiempo, a los 0, 15 y 30 días después del transplante (equivalente a 0.0923 l de OHF por aplicación).

En el segundo experimento, aquel relacionado con betabel, los tratamientos aplicados fueron:

- B1* : Se agregó 0 kg N ha⁻¹ de OHF a la unidad experimental a los 0, 15 y 30 días después del transplante.
- B2* : Se agregó 30 kg N ha⁻¹ de OHF a la unidad experimental dividido equitativamente en tres estratos de tiempo, a los 0, 15 y 30 días después del transplante⁷(equivalente a 0.0138 l de OHF por aplicación).
- B3* : Se agregó 60 kg N ha⁻¹ de OHF a la unidad experimental dividido equitativamente en tres estratos de tiempo, a los 0, 15 y 30 días después del transplante (equivalente a 0.0276 l de OHF por aplicación).
- B4* : Se agregó 120 kg N ha⁻¹ de OHF a la unidad experimental dividido equitativamente en tres estratos de tiempo, a los 0, 15 y 30 días después del transplante (equivalente a 0.0553 l de OHF por aplicación).
- B5* : Se agregó 240 kg N ha⁻¹ de OHF a la unidad experimental dividido equitativamente en tres estratos de tiempo, a los 0, 15 y 30 días después del transplante (equivalente a 0.1106 l de OHF por aplicación).

La aplicación del principio básico de repetición en los tratamientos, dentro del diseño experimental, nos permitirá distinguir mejor qué parte de la variabilidad total de los datos se debe al error aleatorio y cuál a los factores de estudio (Badii et al., 2007). En las experimentaciones que realizamos, basándonos en los precedentes, el conocimiento técnico y práctico del fenómeno, el costo del experimento, el tiempo y la precisión deseada, se determinó replicar 8 veces cada tratamiento en el experimento con lechuga y replicar 6 veces cada tratamiento en el experimento con betabel. La Figura 2.5 da una representación esquemática del número de tratamientos con sus respectivas repeticiones para cada experimento.

⁶De acuerdo con Sene et al. (2012) aplicar la OHF en diferentes tiempos, dentro del periodo de cultivo, mejora la absorción de nutrientes generando un mayor desarrollo vegetativo y evitando el estrés de la planta. Mamani et al. (2015) aplican la OHF en estratos de tiempo similares.

⁷Pradhan et al. (2010) y Mnkeni et al. (2008) aplican la OHF en estratos de tiempo similares.

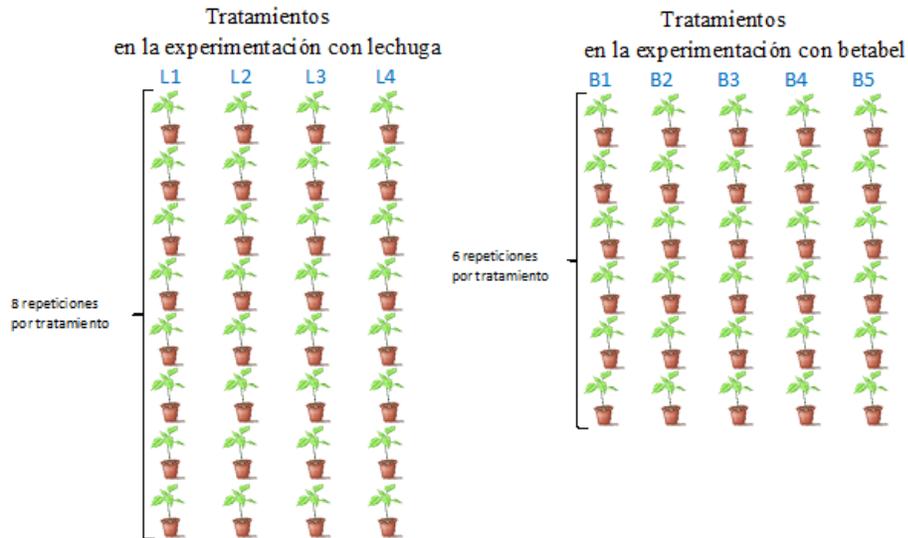


Figura 2.5: Diseño esquemático de los tratamientos y repeticiones por cada experimento.

Selección del diseño experimental

Uno de los objetivos específicos que se perseguía a través de la realización de cada uno de los experimentos fue *comparar los diferentes tratamientos* respecto a cómo afectaban en el desarrollo vegetativo de las plantas de lechuga y betabel. Basándonos en los antecedentes y el conocimiento técnico y práctico del fenómeno se determinó proponer solo un factor de estudio para cada diseño experimental, en consecuencia, la comparación de los tratamientos (para cada experimento, respectivamente) nos permitiría obtener una validación o refutación parcial de las hipótesis de investigación. Por otra parte, *el número de niveles que tiene el factor de estudio, los efectos que nos interesan investigar, el costo del experimento, el tiempo, la precisión deseada y los precedentes* fueron los factores que determinaron la elección del diseño experimental, **un diseño experimental completamente al azar**.

Descripción experimental - Experimentación con lechuga

El experimento dio inicio el 1 de julio (al cual denominamos día cero de experimentación) llevando a cabo lo siguiente.

A cada una de las 32 macetas destinadas para el experimento se les colocó de manera uniforme y homogénea 5 l de sustrato. Posteriormente, del almácigo con 100 plántulas de lechuga se seleccionaron 32 que presentaran (subjetivamente) un mejor desarrollo vegetativo; el motivo de la selección determinista fue garantizar el trasplante de la plántula; las plántulas con un mejor desarrollo vegetativo presentan un menor estrés al cambio o modificación de su ambiente. Se trasplantó una plántula, de las 32 seleccionadas, por maceta; el procedimiento del trasplante se trató de llevar a cabo de manera similar para cada plántula.

Una vez conformada cada unidad experimental (unidad experimental \equiv planta-sustrato-maceta) se procedió de la siguiente manera para aplicar los tratamientos:

1. Se formaron en línea recta las 32 unidades experimentales.



2.4 Metodología de las experimentaciones

- De manera aleatoria se asignaron los tratamientos L1, L2, L3 y L4 a las unidades experimentales.



- A cada unidad experimental se le aplicó su respectivo tratamiento: la cantidad de orina fue medida con una probeta, diluida en agua en una porción 1 : 4 (1 parte de orina por 4 de agua) y la mezcla fue vertida en la base del tallo de la plántula.

Posterior a los tres puntos de anteriores, se procedió a posicionar cada unidad experimental de manera aleatoria dentro del invernadero. Dadas las características físicas del invernadero, especificadas en la Sección 2.4, se distribuyeron al azar las 32 unidades experimentales en 4 filas (8 unidades experimentales por fila); dos filas se colocaron en el soporte de concreto-este y las otras dos filas se colocaron en el soporte de concreto-oeste, Figura 2.6.

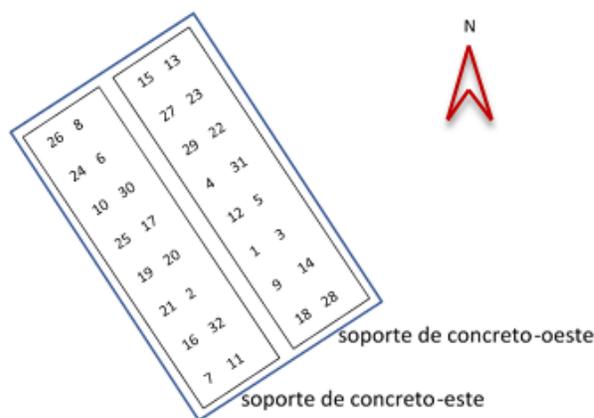


Figura 2.6: Representación visual de la distribución de cada unidad experimental dentro del invernadero.

Después de la colocación de las unidades experimentales dentro del invernadero, cada planta fue regada con 500ml de agua; el riego fue realizado hacia el sustrato, alrededor de la planta comenzado por el centro y terminando en la orilla de la maceta tratando de evitar los lixiviados; fue colocado un plato de polietileno debajo de cada maceta con el objetivo de recuperar algún lixiviado e inmediatamente volver a agregarlo al sustrato.

Para los días siguientes se determinó la aplicación de riego de agua cada segundo día bajo la metodología señalada en el párrafo anterior, posterior a la colocación de agua se observó cada una de las unidades experimentales con el objetivo de prevenir y/o controlar alguna enfermedad causada por parásitos u hongos.

Día quince (16 de julio). Se colocó la segunda aplicación de OHF a cada unidad experimental de acuerdo con su correspondiente tratamiento. Al igual que la primera aplicación, llevada a cabo el día cero de la experimentación, se suministró a cada unidad experimental la cantidad correspondiente de orina (medida con una probeta, diluida en agua en una porción 1 : 4 y vertida en la base del tallo de la planta), posteriormente se agregó 500ml de agua.

Día treinta (31 de julio). Se colocó la tercera aplicación de OHF a cada unidad experimental de acuerdo con su correspondiente tratamiento; medida con una probeta y vertida en la base del tallo de la planta se suministró la cantidad correspondiente de orina diluida en agua en una porción 1 : 4, posteriormente se agregó 500ml de agua.

Día sesenta (30 de agosto). Se cosechó cada una de las plantas; con el mayor cuidado posible se extrajo cada planta de su maceta para posteriormente ser pesada y medida.

Descripción experimental - Experimentación con betabel

El experimento dio inicio el 23 de septiembre (al cual denominamos día cero de experimentación) llevando a cabo lo siguiente.

A cada una de las 30 macetas destinadas para el experimento se les colocó de manera uniforme y homogénea 5 l de sustrato. Posteriormente, del almácigo con 100 plántulas de betabel se seleccionaron 30 que presentaran (subjektivamente) un mejor desarrollo vegetativo; el motivo de la selección determinista fue garantizar el trasplante de la plántula; las plántulas con un mejor desarrollo vegetativo presentan un menor estrés al cambio o modificación de su ambiente. Se trasplantó una plántula, de las 30 seleccionadas, por maceta; el procedimiento del trasplante se trató de llevar a cabo de manera similar para cada plántula.

Una vez conformada cada unidad experimental (unidad experimental \equiv planta-sustrato-maceta) se procedió de la siguiente manera para aplicar los tratamientos:

1. Se formaron en línea recta las 30 unidades experimentales.



2. De manera aleatoria se asignaron los tratamientos B1, B2, B3, B4 y B5 a las unidades experimentales.



3. A cada unidad experimental se le aplicó su respectivo tratamiento: la cantidad de orina fue medida con una probeta, diluida en agua en una porción 1 : 4 (1 parte de orina por 4 de agua) y la mezcla fue vertida en la base del tallo de la plántula.

Posteriormente a los tres puntos de arriba, se procedió a posicionar cada unidad experimental de manera aleatoria dentro del invernadero. Dadas las características físicas del invernadero, especificadas en la Sección 2.4, se distribuyeron al azar las 30 unidades experimentales en 4 filas (ver Figura 2.7); dos filas se colocaron en el soporte de concreto-este y las otras dos filas se colocaron en el soporte de concreto-oeste.

Después de la colocación de las unidades experimentales dentro del invernadero, cada planta fue regada con 500 ml de agua; el riego fue realizado hacia el sustrato, alrededor de la planta comenzado por el centro y terminando en la orilla de la maceta tratando de evitar los lixiviados; fue colocado un plato de polietileno debajo de cada maceta con el objetivo de recuperar algún lixiviado e inmediatamente volver a agregarlo al sustrato.

Para los días siguientes se determinó la aplicación de riego de agua cada segundo día bajo la metodología señalada en el párrafo anterior, posterior a la colocación de agua se observó cada una de las unidades experimentales con el objetivo de prevenir y/o controlar alguna enfermedad causada por parásitos, hongos o virus.

Día catorce (7 de octubre). Se colocó la segunda aplicación de OHF a cada unidad experimental de acuerdo con su correspondiente tratamiento. Al igual que la primera aplicación se suministró a cada unidad experimental la cantidad correspondiente de orina (medida con una probeta y vertida en la base del tallo de la planta), posteriormente se agregó 500 ml de agua.

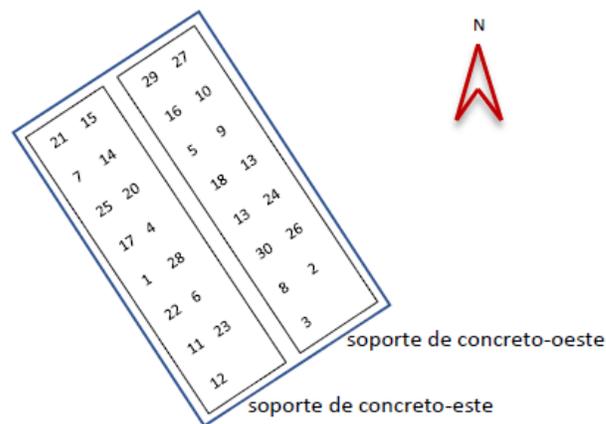


Figura 2.7: Representación visual de la distribución de cada unidad experimental dentro del invernadero.

Día treinta (23 de octubre). Se colocó la tercera aplicación de OHF a cada unidad experimental de acuerdo con su correspondiente tratamiento; medida con una probeta y vertida en la base del tallo de la planta se suministró la cantidad correspondiente de orina, posteriormente se agregó 500 ml de agua.

Día setenta y tres (5 de diciembre). Se cosechó cada una de las plantas; con el mayor cuidado posible se extrajo cada planta de su maceta para posteriormente ser pesada y medida.

2.5. Algunas observaciones de los experimentos

Experimentación con lechuga

Referente a la ejecución del primer experimento, aquel relacionado con cultivo de lechugas, podemos hacer las siguientes observaciones:

1. La ejecución del experimento tuvo una duración de 61 días, durante la semana posterior al día inicial comentado arriba se notó un decaimiento en el vigor (estrés) de una de las plantas pertenecientes a la población a la cual se le aplicó el tratamiento L1; por otra parte, contrastando con las demás unidades experimentales del mismo tratamiento no se percibió algún tipo de anomalía. En la segunda semana de experimentación se tuvo el deceso de la planta; se desconoce las causas que lo provocaran.
2. En el día quince del experimento se colocó la segunda cantidad de orina humana fermentada a cada unidad experimental según su tratamiento, en los días subsecuentes una planta perteneciente a la población sometida al tratamiento L4 presentó un decaimiento en todas sus hojas; suponemos que esta planta, a diferencia de las demás pertenecientes a la misma población, resintió la carga de sodio presente en la orina humana, en los días posteriores la planta pereció.
3. Como última observación, señalamos una presencia disminuida de pulgones (áfidos) en las plantas de lechuga, principalmente aquellas sometidas al tratamiento L4. Suponemos que la presencia de estos insectos, según Teoría de la Trofobiosis, se debe al desbalance nutricional que pudieron tener las plantas; el exceso de sodio en el sustrato de cultivo propicia una mala absorción de nutrientes para las plantas.
Los áfidos fueron extraídos manualmente de las hojas de las plantas sin ningún problema posterior.

Para finalizar mostramos a continuación algunas fotos tomadas durante la experimentación, Figuras 2.8, 2.9 y 2.10.



Figura 2.8: Segunda aplicación de OHF a las unidades experimentales. Día catorce del experimento.



Figura 2.9: Unidades experimentales antes de tomar sus respectivas mediciones. Día sesenta del experimento.



Figura 2.10: Plantas de lechuga sometidas a los tratamientos L1, L2, L3 y L4, respectivamente. Día sesenta.

Experimentación con betabel

Respecto al segundo experimento, aquel relacionado con betabel, podemos señalar las siguientes observaciones:

1. Después de la segunda aplicación de orina, una de las plantas sometidas al tratamiento B3 presentó un decaimiento generalizado en todas sus hojas, las demás plantas pertenecientes a la misma población no mostraron visualmente alguna alteración. En los días siguientes la planta no mostro mejora y pereció.
2. Aunque el betabel presenta una mejor tolerancia a la salinidad y un pH elevado en suelo, el deceso de planta comentado en el primer punto se desconoce. Sin embargo, recordemos que estamos haciendo investigación sobre un proceso biológico; “los cuales se caracterizan por ser procesos donde interviene muchas variables que están interactuando de manera muy compleja”

A continuación mostramos dos fotos tomadas durante la experimentación, Figuras 2.11 y 2.12.



Figura 2.11: Preparación de la OHF para ser aplicada a las unidades experimentales. Día treinta del experimento.



Figura 2.12: Preparación de las unidades experimentales para toma de mediciones. Día setenta y tres del experimento.

Capítulo 3

Análisis de los experimentos iniciales

En el presente capítulo se llevará a cabo el análisis de los experimentos presentados en el capítulo anterior. Siguiendo el esquema secuencial de cualquier desarrollo experimental, ya hemos culminado la fase de ejecución: fase de características más activas que sustenta su acción en la planeación, para dar paso al análisis: etapa preliminar a las conclusiones que tiene como objetivo el examen sistemático y detallado de lo que ocurrió durante la etapa de ejecución, así como de los resultados que fueron arrojados a través de las variables de respuesta y de los objetivos formulados. En las dos primeras secciones; Caracterización de la orina humana y Caracterización del sustrato, se muestran los resultados cuantitativos de la búsqueda de parámetros físico-químicos y microbiológicos. Los valores obtenidos serán contrastados con los resultados de cada prueba experimental y presentados en el capítulo de conclusiones. Por último en la sección Gráficas y ANOVA damos una representación visual y preliminar del análisis de los datos obtenidos a través de la experimentación y finalizamos el examen de los resultados mediante un procedimiento analítico.

3.1. Caracterización de la orina humana

Como lo comentamos en las Secciones 1.2 y 1.5, parte relevante del trabajo de investigación es mostrar el aporte de macronutrientes y micronutrientes disponibles de la OHF para su uso en cultivos. En la Sección 2.1 se mencionaron características de la orina relacionadas con las experimentaciones: fuente de procedencia, tratamiento, almacenamiento y determinación de algunos parámetros. Presentamos los resultados de los análisis físico-químicos y microbiológicos efectuados a la orina usada en los experimentos.

Cuadro 3.1: Parámetros determinados en la OH.

| Parámetro | Valor | Parámetro | Valor | Parámetro | Valor |
|---------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|--------------------------|-------------------|------------------------|
| pH | 8.94 | Carbonatos (CO_3^{2-}) | 576.0 mg l ⁻¹ | Cu | 0 mg l ⁻¹ |
| Conductividad eléctrica | 31.2 dS m ⁻¹ | Bicarbonatos (HCO_3^{-1}) | 90.0 mg l ⁻¹ | Zn | 0.1 mg l ⁻¹ |
| N-total | 4377.5 mg l ⁻¹ | Sulfatos (SO_4^{2-}) | 710.0 mg l ⁻¹ | Coliformes | Negativo |
| Fosfatos (PO_4^{-3}) | 180.9 mg l ⁻¹ | Cloruros (Cl^{-1}) | 367.5 mg l ⁻¹ | BMA | Negativo |
| Potasio (K^{1+}) | 1860.0 mg l ⁻¹ | Magnesio (Mg^{2+}) | 50.7 mg l ⁻¹ | Samonella | Negativo |
| Calcio (Ca^{2+}) | 289.9 mg l ⁻¹ | Mn | 2.4 mg l ⁻¹ | Mohos y levaduras | Negativo |
| Sodio (Na^{1+}) | 1400.0 mg l ⁻¹ | Fe | 8.9 mg l ⁻¹ | | |

3.2. Caracterización del sustrato

Presentamos los valores de parámetros específicos analizados en el sustrato ocupado. En la Sección 2.2 habíamos descrito características relevantes del material ocupado como medio de cultivo, señalando su participación como parte estructural de la unidad experimental. Aunque el sustrato no fue considerado un factor de estudio dentro del diseño experimental, su incidencia en los experimentos es determinante por ser una parte constituyente de aquellos objetos físicos sometidos a los tratamientos.

Cuadro 3.2: Parámetros determinados en el sustrato.

| Parámetro | Valor | Parámetro | Valor |
|------------------------------------|------------------------------|-------------------|---------------------------|
| pH | 8.28 | Calcio | 280.54 mg l ⁻¹ |
| Densidad Aparente | 1.3354 g ml ⁻¹ | Colformes | Negativo |
| Porcentaje de saturación | 38.38 % | BMA | Negativo |
| Capacidad de intercambio catiónico | 7 Centi moles/kg de suelo | Samonella | Negativo |
| Acidez extraíble | 17.6 Centi moles/kg de suelo | Mohos y levaduras | Negativo |
| Cloruros | 53.17 mg l ⁻¹ | | |

3.3. Caracterización de la planta

Se realizó un estudio microbiológico de las plántulas utilizadas para la experimentación, en él se buscaron determinados patógenos que pudieran inferir en la hipótesis de posible inocuidad de la orina humana fermentada. Como lo comentamos en la Sección 2.3, la determinación de cada parámetro está basado en su respectiva metodología; donde cada metodología está especificada por su norma mexicana.

Cuadro 3.3: Parámetros determinados en plántulas de lechuga y betabel.

| Parámetro | Valor determinado en plántulas de lechuga | Valor determinado en plantulas de betabel |
|-------------------|---|---|
| Colformes | Negativo | Negativo |
| BMA | Negativo | Negativo |
| Samonella | Negativo | Negativo |
| Mohos y levaduras | Negativo | Negativo |

3.4. Gráficas y ANOVA

Primer experimento

A continuación, describiremos la manera en la cual dispondremos de los datos obtenidos del primer experimento a través de las variables de respuesta: ancho de hoja, longitud de hoja y peso de planta.

Como en la planeación del experimento se determinó un diseño balanceado (cada tratamiento tiene un mismo número de repeticiones) para cada variable de respuesta, podemos representar los datos a través de una plantilla modelo, Cuadro 3.4 Tabla izquierda. Para cada una de las variables de respuesta denotemos por Y_{ij} la variable aleatoria que representa, respectivamente, el valor de la variable de respuesta respecto a la unidad experimental j sometida al tratamiento Li , donde $j = 1, \dots, 8$ e $i = 1, \dots, 4$. Por ejemplo, si buscamos interpretar los valores obtenidos a través de la variable de respuesta peso de planta, entonces Y_{ij} puede modelar los valores de la variable de respuesta peso de planta de la unidad experimental j sometida al tratamiento Li . El Cuadro 3.4 ayuda a entender mejor la idea planteada.

3.4 Gráficas y ANOVA

La Tabla izquierda es la Tabla modelo que **representa de manera genérica** el arreglo de los tratamientos y sus replicaciones para cada variable de respuesta, respectivamente. En la Tabla derecha superior presentamos los valores obtenidos de la experimentación, respecto a la variable de respuesta ancho de hoja medida en centímetros. La Tabla derecha en medio presenta los valores obtenidos de la experimentación, respecto a la variable de respuesta longitud de hoja medida en centímetros. Por último la Tabla derecha inferior presenta los valores obtenidos de la experimentación, respecto a la variable de respuesta peso de planta en gramos.

Cuadro 3.4: Datos obtenidos del experimento en lechuga.

| Tratamientos | L1 | L2 | L3 | L4 |
|--------------|----------|----------|----------|----|
| Y_{11} | Y_{21} | Y_{31} | Y_{41} | |
| Y_{12} | Y_{22} | Y_{32} | Y_{42} | |
| Y_{13} | Y_{23} | Y_{33} | Y_{43} | |
| Y_{14} | Y_{24} | Y_{34} | Y_{44} | |
| Y_{15} | Y_{25} | Y_{35} | Y_{45} | |
| Y_{16} | Y_{26} | Y_{36} | Y_{46} | |
| Y_{17} | Y_{27} | Y_{37} | Y_{47} | |
| Y_{18} | Y_{28} | Y_{38} | Y_{48} | |

| Tratamientos | L1 | L2 | L3 | L4 |
|---|-------|-------|-------|-------|
| | 94.1 | 96.7 | 103 | 0 |
| | 94.3 | 89.8 | 98.2 | 98.9 |
| Realizaciones de las V.A's. Y_{ij} respecto a la variable de respuesta ancho de hoja | 91.6 | 110 | 99.9 | 105 |
| | 91.9 | 109 | 105 | 101 |
| | 89.2 | 111 | 122 | 123 |
| | 112 | 117 | 117.1 | 94.6 |
| | 106 | 114 | 122 | 129 |
| | 0 | 121 | 114 | 128 |
| | 216 | 235 | 241 | 0 |
| | 235 | 226 | 240 | 227 |
| Realizaciones de las V.A's. Y_{ij} respecto a la variable de respuesta longitud de hoja | 228 | 243 | 238 | 213 |
| | 221 | 248 | 235 | 234 |
| | 191 | 205 | 218 | 216 |
| | 217 | 209 | 208 | 211 |
| | 194 | 220 | 234 | 227 |
| | 0 | 226 | 219 | 243 |
| | 103.5 | 110.8 | 138.6 | 0 |
| | 113 | 100.5 | 117.9 | 103.2 |
| Realizaciones de las V.A's. Y_{ij} respecto a la variable de respuesta peso de planta | 107.2 | 149 | 107.3 | 146.1 |
| | 97 | 165.1 | 142 | 130.3 |
| | 140.3 | 189.8 | 226.8 | 238.6 |
| | 159.2 | 180.2 | 214.1 | 109.6 |
| | 158.8 | 175.8 | 198.2 | 307.3 |
| | 0 | 207.4 | 189.3 | 221.3 |

Usando los datos del Cuadro 3.4 presentamos tres gráficas de cajas y tres gráficas de medias con intervalos de confianza, el objetivo es dar una representación visual del análisis del experimento.

Comenzando con la gráfica que representa los valores de la variable de respuesta ancho de hoja vs tratamientos, Figura 3.1, percibimos que no existe una diferencia visualmente relevante en la dispersión horizontal de las cajas; la posición que ocupan se condensa al extremo derecho.

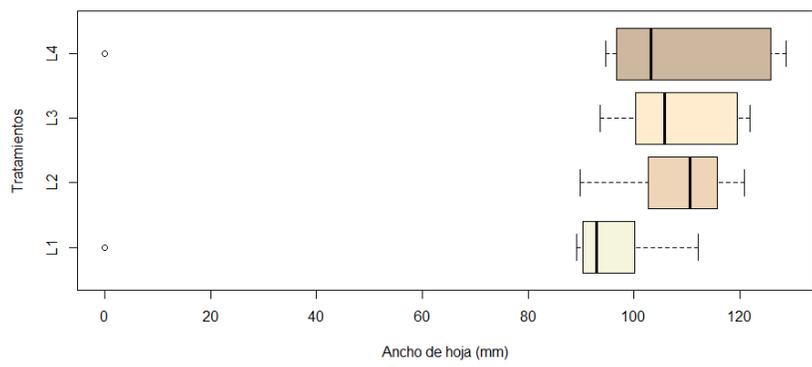


Figura 3.1: Ancho de hoja en plantas de lechuga sometidas a diferentes tratamientos.

La siguiente gráfica presenta el contraste entre los valores de la variable de respuesta longitud de hoja y los tratamientos, Figura 3.2. Similar a la gráfica anterior, visualmente no se percibe un contraste relevante en la dispersión horizontal de las cajas, más aun, las cajas que corresponden a los tratamientos L2, L3 y L4 se perciben superpuestas.

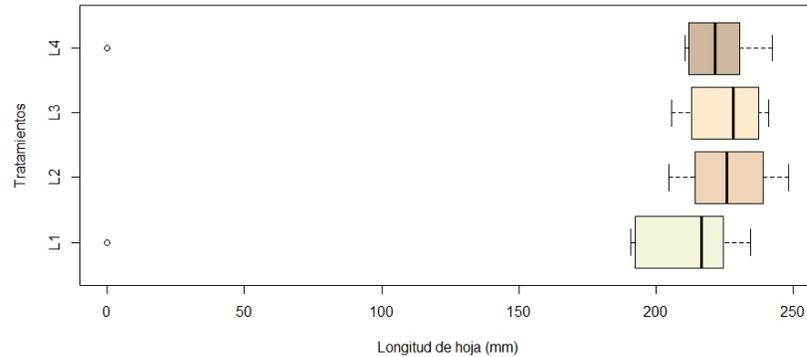


Figura 3.2: Longitud de hoja en plantas de lechuga sometidas a diferentes tratamientos.

Por último, en la gráfica peso de planta vs tratamientos, Figura 3.3, tampoco se percibe una variación relevante en la posición horizontal de las cajas similar a las dos gráficas anteriores; las cajas que corresponden a los tratamientos L2, L3 y L4 se encuentran superpuestas.

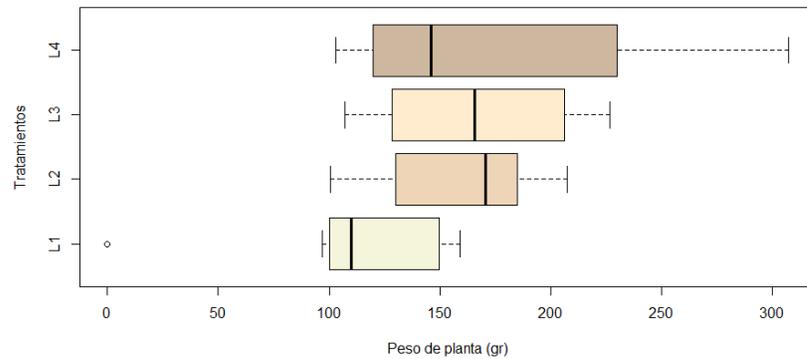


Figura 3.3: Peso de plantas de lechuga sometidas a diferentes tratamientos.

Como una conclusión preliminar que podemos extraer de las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3 es la posibilidad de no haber efecto de tratamientos para cada variable de respuesta, respectivamente.

Los gráficos de medias con intervalos de confianza permiten hacer una comparación visual y estadística de las medias de los tratamientos para así saber cuáles tratamientos difieren entre sí. Si dos intervalos de confianza se traslapan, los tratamientos correspondientes son estadísticamente iguales en cuanto a sus medias; pero si no se traslapan, entonces son diferentes. En consecuencia, de los gráficos de medias con intervalos de confianza de la Figura 3.4, podemos suponer que todos los tratamientos son estadísticamente iguales en cuanto a sus medias, análogo a la conclusión obtenida mediante las gráficas de cajas.

3.4 Gráficas y ANOVA

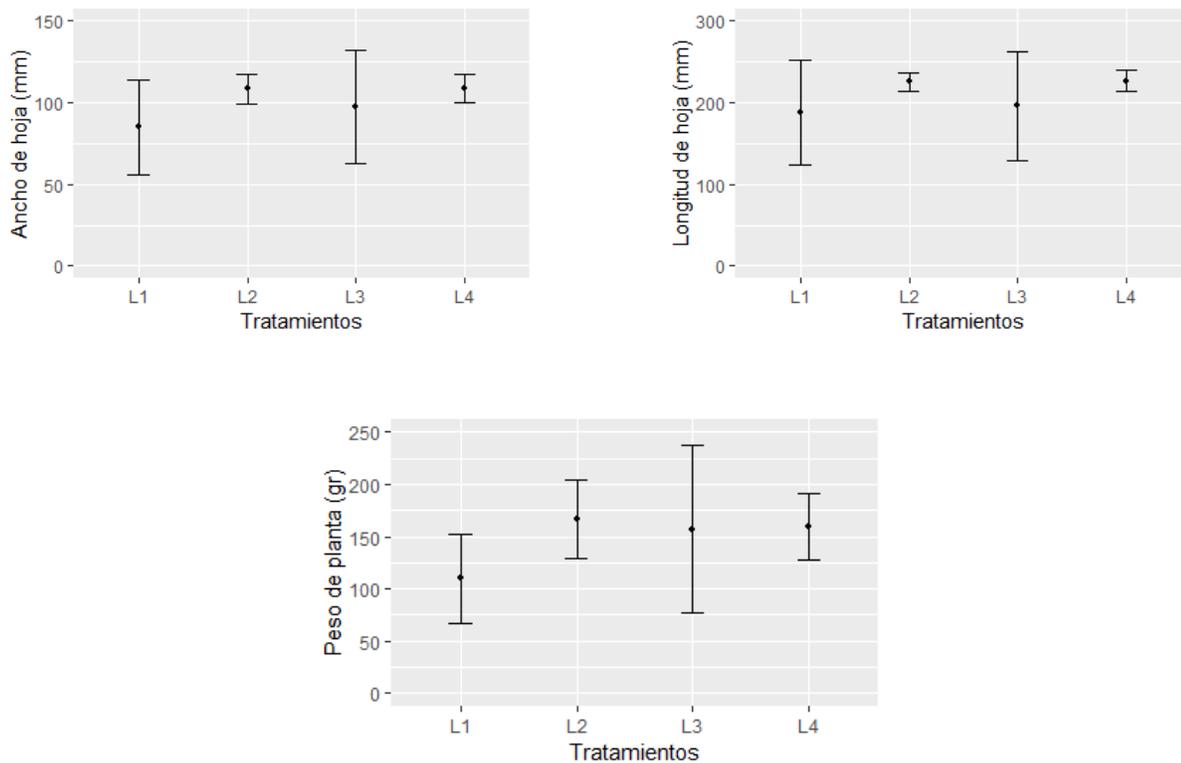


Figura 3.4: Intervalos de confianza al 95 % para las medias de los tratamientos, según su respectiva variable de respuesta.

Para corroborar o refutar la conclusión preliminar que acabamos de mencionar pasamos al examen analítico. Mediante el análisis de varianza examinaremos la presencia o ausencia de efecto de los tratamientos para cada una de las variables de respuesta, en otras palabras, podremos identificar si los tratamientos son estadísticamente iguales o no. Comenzaremos por mostrar el modelo que sigue cada variable aleatoria de acuerdo a un diseño completamente al azar, y posteriormente verificar que se cumplen los supuestos establecidos en la Sección 1.5 para efectuar el ANOVA. Ya que todas las funciones necesarias para el análisis se encuentran programadas en el software R, procedimos a utilizarlo para efectuar cada una de las pruebas correspondientes; las salidas del programa para cada prueba son presentadas en el Apéndice A.

Para analizar el primer experimento (enfocándose a cada una de las variables de respuesta, respectivamente) ocupamos el siguiente modelo:

$$Y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij}, \text{ con } j = 1, \dots, 8 \text{ e } i = 1, \dots, 4.$$

en donde:

- Y_{ij} es la variable aleatoria que representa el valor de la variable de respuesta (ancho de hoja, longitud de hoja ó peso de planta, respectivamente) respecto a la unidad experimental j sometida al tratamiento L_i (Cuadro 3.4).
- μ_i es la respuesta promedio al tratamiento L_i .
- ε_{ij} es la variable aleatoria que representa el error atribuible a la medición Y_{ij} .

Mediante los gráficos Q-Q podemos verificar de manera visual el cumplimiento del supuesto de normalidad de los residuos. Notemos que en cada uno de los gráficos de la Figura 3.5 se percibe el alineamiento de los puntos, lo cual sugiere que los residuos se distribuyen de manera normal, donde a) corresponde a los valores de la variable de respuesta ancho de hoja, b) corresponde a los valores de la variable de respuesta longitud de hoja y c) corresponde a los valores de la variable de respuesta peso de planta.

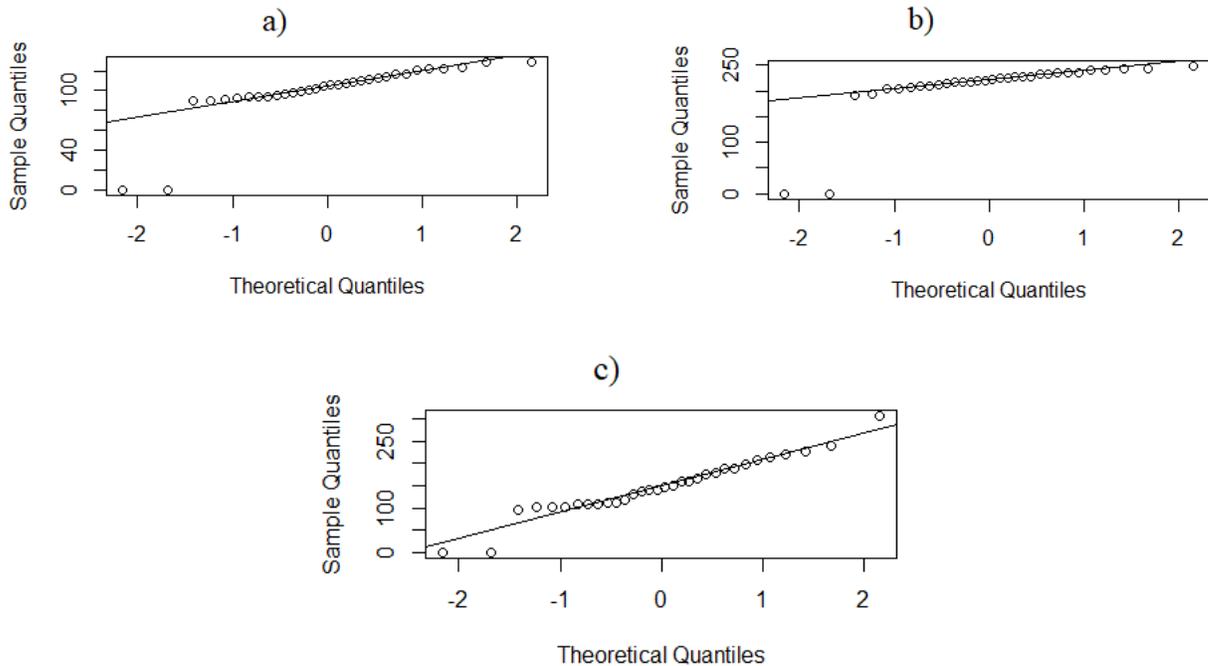


Figura 3.5: Normal Q-Q plots, según su respectiva variable de respuesta.

Para verificar de manera analítica el supuesto de normalidad de los residuos se llevó a cabo la prueba de Kolmogórov-Smirnov, en ella se plantea el juego de hipótesis H_0 vs H_1 , donde H_0 supone que los datos proceden de una distribución normal y H_1 supone que los datos no proceden de una distribución normal; mediante el respectivo estadístico de prueba se hace inferencia sobre la decisión de aceptar H_0 , o rechazar H_0 a favor de H_1 .

Para la población que corresponde a la variable de respuesta ancho de hoja la prueba de Kolmogórov-Smirnov generó el p -valor de 0.1293; en consecuencia, no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula; por tanto, los datos provienen de una distribución normal. Análogamente, para las variables de respuesta longitud de hoja y peso de planta se obtuvo, $p = 0.9038$ y $p = 0.6174$, respectivamente.

Para verificar la homogeneidad de las varianzas se ocupó la prueba de Fligner-Killeen, esta prueba contrasta las hipótesis, H_0 la cual supone igualdad de las varianzas y H_1 la cual supone que al menos dos varianzas son diferentes. Al efectuar la prueba respecto a la población vinculada con el ancho de hoja se obtuvo el p -valor, $p = 0.2618$; en consecuencia, no hay evidencia significativa para afirmar que las varianzas difieren. Similarmente, para las variables de respuesta longitud de hoja y peso de planta se obtuvo $p = 0.8921$ y $p = 0.222$, respectivamente.

Dado que el software R cuenta con las funciones necesarias para el análisis de la varianza, procedimos a utilizarlo para efectuar cada una de las pruebas correspondientes a la respectiva variable de respuesta obteniendo lo siguiente¹:

¹Para fines prácticos se expuso solamente el p -valor, en el Apéndice A se presentan las salidas del programa para cada una de las variables de respuesta, Cuadros A.3, A.6 y A.9, respectivamente.

- El análisis de la varianza respecto a la variable de respuesta ancho de hoja demostró que no hay efecto de los tratamientos, puesto que $p = 0.308$.
- El análisis de la varianza respecto a la variable de respuesta longitud de hoja demostró que no hay efecto de los tratamientos, puesto que $p = 0.412$.
- El análisis de la varianza respecto a la variable de respuesta peso de planta demostró que no hay efecto de los tratamientos, puesto que $p = 0.258$.

Segundo experimento

La ejecución del segundo experimento generó datos: precisamente aquellos valores obtenidos a través de la variable de respuesta. Recordemos que en el diseño experimental (Sección 2.4) sólo se propuso una variable de respuesta, el peso de la planta de cada unidad experimental. Sea Y_{ij} la variable aleatoria que denota el valor de la variable de respuesta respecto a la unidad experimental j sometida al tratamiento B_i , es decir, la variable aleatoria Y_{ij} denota el peso de la planta medida en gramos que conforma la unidad experimental j sometida al tratamiento B_i , donde $j = 1, \dots, 6$ e $i = 1, \dots, 5$.

Los valores de la variable de respuesta obtenidos del segundo experimento los dispusimos de la siguiente manera. En el Cuadro 3.5, a la izquierda está la Tabla modelo y a la derecha la Tabla de los valores numéricos generados por el experimento respecto a la variable de respuesta peso de planta en gramos, equivalentemente una realización de cada una de las variables aleatorias Y_{ij} .

Cuadro 3.5: Datos obtenidos del experimento en betabel.

| Tratamientos | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | Tratamientos | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|--------------------------------------|------|-------|------|-------|-------|
| | Y_{11} | Y_{21} | Y_{31} | Y_{41} | Y_{51} | | 37.5 | 66.4 | 64 | 138.4 | 114.2 |
| | Y_{12} | Y_{22} | Y_{32} | Y_{42} | Y_{52} | | 30.5 | 45 | 0 | 134.3 | 16.2 |
| V.A's. que modelan la variable de respuesta | Y_{13} | Y_{23} | Y_{33} | Y_{43} | Y_{53} | Realizaciones de las V.A's. Y_{ij} | 54.4 | 30.7 | 67.3 | 145.3 | 3.3 |
| | Y_{14} | Y_{24} | Y_{34} | Y_{44} | Y_{54} | | 38.4 | 89.2 | 51.6 | 131.6 | 67.8 |
| | Y_{15} | Y_{25} | Y_{35} | Y_{45} | Y_{55} | | 52.7 | 112.1 | 61.3 | 90.6 | 55.1 |
| | Y_{16} | Y_{26} | Y_{36} | Y_{46} | Y_{56} | | 80.7 | 59.1 | 55.2 | 110.2 | 42.9 |

A través de los valores en la tabla derecha del Cuadro 3.5 generamos las gráficas de las Figuras 3.6 y 3.7. La gráfica de cajas presentada nos proporciona un examen visual de los datos obtenidos a través del segundo experimento. En la dispersión horizontal de las cajas se destaca el tratamiento B4 correspondiente a la caja ubicada al extremo derecho; podemos inferir la existencia de efecto de tratamientos para la variable de respuesta peso de planta.

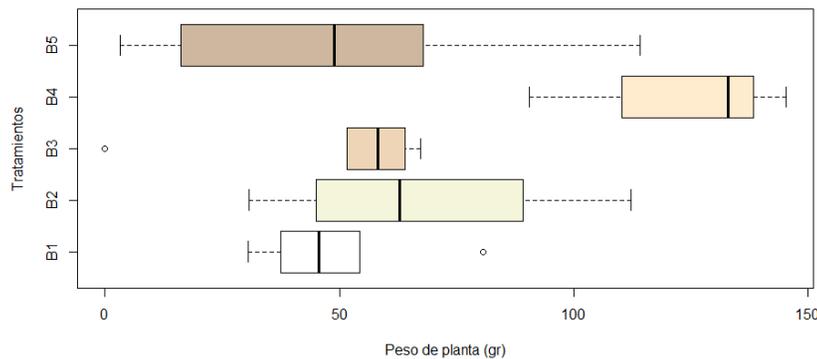


Figura 3.6: Gráfica de cajas para la experimentación con betabel

En el gráfico de medias con intervalos de confianza (Figura 3.7) reafirmamos la suposición generada por la gráfica de cajas; el tratamiento B4 no está traslapado con algún otro, lo cual sugiere que la respuesta promedio al tratamiento B4 difiere de las demás.

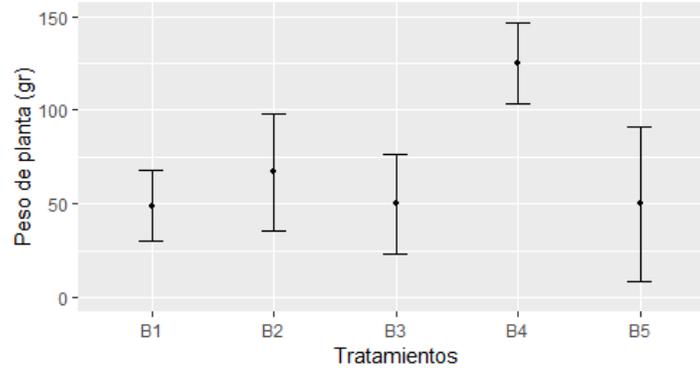


Figura 3.7: Intervalos de confianza al 95 % para las medias de los tratamientos.

Por otro lado, el análisis que mostraremos a continuación valida las inferencias mencionadas. Se propuso el siguiente modelo para el análisis del segundo experimento:

$$Y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij}, \text{ con } j = 1, \dots, 6 \text{ e } i = 1, \dots, 5.$$

en donde:

- Y_{ij} es la variable aleatoria que representa el valor de la variable de respuesta respecto a la unidad experimental j sometida al tratamiento B_i (Cuadro 3.5).
- μ_i es la respuesta promedio al tratamiento B_i .
- ε_{ij} es la variable aleatoria que representa el error atribuible a la medición Y_{ij} .

La Figura 3.8 nos muestra un gráfico Q-Q, el cual sugiere normalidad de los residuos; validamos el supuesto con la prueba de Kolmogórov-Smirnov obteniendo el p -valor, $p = 0.9051$.

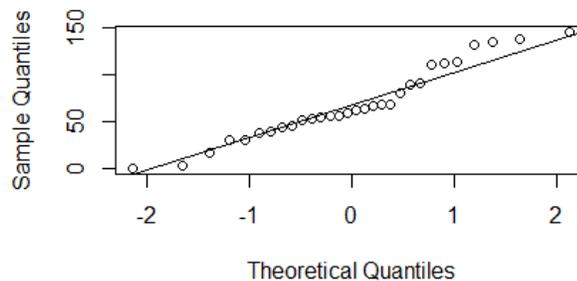


Figura 3.8: Normal Q-Q plot para los datos del segundo experimento.

Para la prueba de homogeneidad de varianzas la prueba de Fligner-Killeen dio el p -valor, $p = 0.49$; en consecuencia, no hay evidencia significativa para afirmar que las varianzas difieren.

Similar a lo comentado en la experimentación con lechuga, se ejecutó el análisis de la varianza usando R. A continuación presentamos el p -valor con el cual podemos hacer inferencia sobre la decisión a optar dentro del juego de hipótesis H_0 vs H_1 :

3.4 Gráficas y ANOVA

- El análisis de la varianza respecto a la variable de respuesta peso de planta demostró que existe efecto de los tratamientos, debido a que $p = 0.000199$.

Dada la existencia de una diferencia significativa entre los tratamientos, el siguiente paso es determinar dónde se encuentra esa diferencia; mediante R y específicamente la referencia De Mendiburu (2017), aplicamos el procedimiento de Tukey ($\alpha = 0.05$) para determinar las variaciones que existen entre los diferentes tratamientos².

Cuadro 3.6: Los tratamientos con la misma letra no son significativamente diferentes ($\alpha = 0.05$).

| Tratamiento | Peso promedio | Grupos |
|-------------|---------------|--------|
| B4 | 125.06667 | a |
| B2 | 67.08333 | b |
| B5 | 49.91667 | b |
| B3 | 49.90000 | b |
| B1 | 49.03333 | b |

Para concluir el análisis del segundo experimento mostramos la Figura 3.9, en ella se presentan los intervalos de confianza (al 95 %) para la media de las diferencias pareadas, donde dos tratamientos difieren significativamente si el intervalo de confianza no intercepta el eje vertical en cero. Precisamente la Figura 3.9 es la forma gráfica del procedimiento de Tukey.

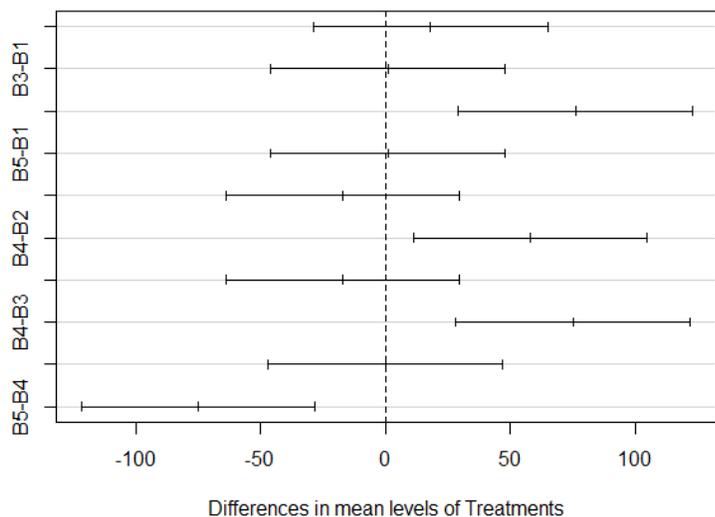


Figura 3.9: Prueba de Tukey con intervalos de confianza al 95 %.

²Para fines prácticos se expuso solamente el p -valor y la tabulación de los tratamientos en grupos; en el Apéndice A presentamos las salidas del programa para cada una de las pruebas realizadas, Cuadros A.12 y A.13.

3.5. Inferencias sobre las experimentaciones

Recapitulación

El trabajo de tesis que presentamos lo iniciamos exponiendo el marco teórico, a través de este damos un fundamento (teórico) de aquello que nos disponemos a investigar, también nos permite conocer los precedentes básicos y los alcances que pudiera tener la investigación; de ese capítulo resaltamos las secciones: la orina humana fermentada y Experimentación: el uso de la OHF en agricultura; ambas nos sirven como referente parcial para redactar la sección Antecedentes, en el cual buscamos resaltar aquellas publicaciones que nos sirvieron de guía para la realización de los experimentos.

En los últimos dos capítulos, Metodología de los experimentos iniciales y Análisis de los experimentos iniciales, hemos expuesto parte medular del trabajo de investigación. Buscando dar una respuesta a las hipótesis planteadas llevamos a cabo, como parte del proceso de investigación, dos experimentos; cada uno dirigido a estudiar el comportamiento de una específica planta bajo determinadas condiciones. La primera experimentación, aquella relacionada con el cultivo de lechuga, no nos ofreció los resultados esperados o supuestos por la hipótesis de investigación; las gráficas presentadas para cada una de las variables de respuesta (Figuras 3.1, 3.2 y 3.3) mostraban una imbricación de las cajas asociadas con su respectivo tratamiento, el posterior análisis de varianza confirmó la inferencia visual: la no existencia de efecto de tratamientos para cada una de las pruebas realizadas.

De forma diferente, en varios aspectos a nivel biológico y químico en comparación con la planta utilizada en el primer experimento, la planta de betabel nos ofrecía cualidades específicas que podrían garantizar una posible conclusión favorable en la investigación. La planta de betabel, tolerante a niveles elevados de salinidad y pH, es una de las mejores opciones para probar el efecto fertilizante de la orina humana en cultivos. Bajo las condiciones en las cuales se realizó el segundo experimento podemos extraer una conclusión parcial: la existencia de efecto de tratamientos; más aún, la existencia de efecto de tratamientos altamente significativa ($p < 0.001$). La gráfica de cajas (Figura 3.6) presentaba una considerable dispersión horizontal de las cajas, mostrando al tratamiento B4 como aquel con un mayor rendimiento de peso, el análisis de la varianza confirma el examen visual y el procedimiento de Tukey señala aquellos tratamientos que no presentan una diferencia significativa (Cuadro 3.6), reiterando al tratamiento B4 como distinto a los demás.

El ciclo Deming

Pasaremos a hablar de un concepto relevante y necesario para fines de nuestra investigación, el ciclo Deming³. Según Gutiérrez y de la Vara (2012) el ciclo Deming es: “una estrategia que busca mejorar continuamente un proceso mediante la aplicación del ciclo: planear, ejecutar, estudiar y actuar”. Y dado que un experimento es “el proceso de seguir un procedimiento bien definido, donde no se conoce el resultado de seguir el procedimiento antes del experimento (Conover, 1999)”; entonces, podemos aplicar el ciclo Deming en cualquier experimentación, particularmente en la experimentación que acabamos de presentar en el capítulo anterior. Siguiendo los pasos del ciclo Deming construimos el esquema de la Figura 3.10, esta figura representa la estrategia planteada por Deming enfocada al diseño de experimentos donde cada uno de los pasos a seguir están estrechamente relacionados con el orden secuencial que conlleva el diseño experimental.

Habíamos mencionado dos hechos fundamentales y culminaciones parciales dentro del proceso de investigación: la no existencia de efecto de tratamientos para la experimentación con lechuga respecto a cada una de sus variables de respuesta y la existencia de efecto de tratamientos para la experimentación con betabel respecto a su única variable de respuesta. Por otra parte, Gutiérrez y de la Vara (2012) señalan un “mayor favorecimiento hacia una experimentación secuencial que a un experimento único y definitivo; considerar como alternativas a diferentes

³William Edwards Deming fue un estadístico estadounidense, profesor universitario, autor de textos y difusor del concepto de calidad total.

fases de experimentación en forma secuencial, en las cuales se alcance paulatinamente una mayor precisión en los conocimientos del fenómeno de estudio”. En consecuencia, la aplicación del ciclo Deming en nuestra investigación vendría a fortalecer el trabajo hasta ahora descrito. Consideramos que el uso de esta estrategia fomenta el cuestionamiento; después de la ocurrencia de los pasos: planeación, ejecución y estudio, la siguiente etapa dentro del ciclo es el actuar, un actuar sustentado por un análisis previo donde se puedan responder los cuestionamientos necesarios para mejora del proceso.

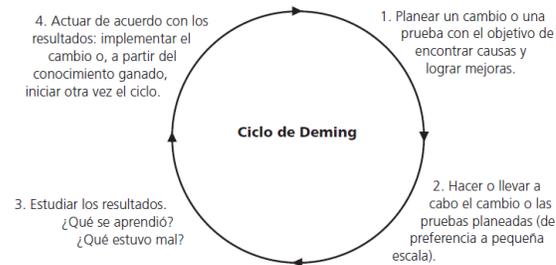


Figura 3.10: Ciclo Deming enfocado a la experimentación.

Consideramos relevante dar seguimiento a la experimentación realizada con betabel, bajo las condiciones del experimento obtuvimos los resultados esperados: la existencia de efecto de tratamientos y la determinación de la posible mejor dosis de aplicación de orina. De acuerdo al ciclo Deming, el siguiente paso sería extraer conclusiones y analizarlas para una posterior vuelta dentro del ciclo de investigación; basándonos en las conclusiones que hemos mencionado y en retrospectiva con la metodología y el análisis de experimentación podemos hacer las siguientes preguntas:

- Respecto al segundo experimento, aquel relacionado con betabel, ¿qué se aprendió?
- ¿Qué deficiencias se tuvo en la planeación y ejecución del experimento?
- ¿Qué variables se pueden modificar en el diseño para mejorar el experimento?

Las preguntas que proponemos nos sitúan en el tercer paso dentro del ciclo, el cuestionamiento de los resultados obtenidos; daremos respuesta a estas preguntas en la siguiente sección para tomar una resolución de cómo debemos continuar con nuestro trabajo de investigación.

Siguiente etapa

Pasemos a responder las preguntas planteadas en la sección anterior, en base a las respuestas se tomara una resolución sobre como dar continuación a la experimentación.

La primera pregunta plantea un cuestionamiento sobre el aprendizaje adquirido respecto al segundo experimento; podemos resaltar que las plantas de betabel reaccionaron a los tratamientos, particularmente el tratamiento B4 tuvo el mejor rendimiento en peso y el tratamiento B5 disminuyó el rendimiento en peso de la planta, **lo cual nos permite asegurar la no existencia de una relación proporcional entre cantidad de orina aplicada y rendimiento en peso de la planta**, es decir, la relación a mayor fertilizante mayor producción no se cumple en esta experimentación.

Pasemos a la segunda pregunta, ¿Qué deficiencias se tuvo en la planeación, ejecución y análisis del experimento?, examinando todos los posibles factores que incidieron en el experimento, a lo largo de las etapas de planeación, ejecución y análisis, resaltamos que como tal, no hubo una deficiencia en alguna etapa de la experimentación, posiblemente algunas complicaciones que tienen que ver con la naturaleza intrínseca de la ejecución del experimento,

como por ejemplo el trasplante de cada plántula a las macetas, el cuidado adecuado que se debe dar observando cada una para evitar un posible deceso, y a pesar de esto dentro de la ejecución del experimento pereció una planta, precisamente una que estaba sujeta al tratamiento B3.

¿Qué variables se pueden modificar en el diseño para mejorar el experimento? Antes de dar una respuesta a la pregunta debemos recordar que el ciclo Deming es una estrategia de mejoramiento paulatino, es decir, las modificaciones aplicadas al proceso deben darse gradualmente para permitir un mejor entendimiento en la relación causa-efecto. Ahora, si existe un cuestionamiento que radica en determinar variables específicas que puedan mejorar el experimento, posiblemente encontremos más de una cuya manipulación pueda generar una mejor experimentación. Sin embargo, bajo los objetivos que tenemos planteados en este trabajo de tesis, las posibles limitaciones que puedan existir para generar una nueva experimentación, los alcances de la investigación, las características inherentes del experimento y la confianza de entender el fenómeno de estudio a través de cambios paulatinos en el proceso de experimentación, nos permiten tomar la decisión de elegir solo una variable a modificar, posiblemente para experimentaciones futuras se puedan hacer otros cambios en busca de distintos resultados.

Retomando la pregunta, si nuestro objetivo es destacar una variable que pueda incidir paulatinamente en la mejora del experimento, la variable “sustrato” destaca por las siguientes cualidades:

1. El ejercicio de un nuevo experimento, al igual que los dos anteriores, conlleva la realización de determinadas actividades secuenciadas; cada una de ellas con características específicas que permiten la fluidez en la ejecución, desde la adquisición de las plántulas destinadas para la experimentación; la limpieza de todos los objetos por utilizar, incluyendo el invernadero; el cuidado que se debe dar a cada planta y la medición del valor referido a la(s) variable(s) de respuesta para cada unidad experimental, entre otros, son tareas posiblemente secundarias; pero necesarias para el buen desarrollo de la actividad experimental, en consecuencia, si buscamos mejorar el proceso mediante un cambio gradual que no dificulte las actividades que hemos señalado, además de otras, podemos elegir cambiar de sustrato por la facilidad adquisitiva, manipulación y semejanza directa con el primer experimento de betabel.
2. Otra cualidad en la modificación del sustrato; para generar un nuevo experimento que nos ayude a comprender mejor el efecto fertilizante de la orina en plantas de betabel, lo podemos extraer de la composición físico-química del posible material a utilizar, la vermiculita. Debido a que la vermiculita es un mineral (formado por silicatos de hierro o magnesio) nos garantiza la no existencia de materia orgánica y la nula presencia de nitrógeno; por tanto, el nitrógeno presente en la orina debería causar un mayor efecto en el desarrollo vegetativo de las plantas. Por otra parte, la vermiculita se puede adquirir previamente sanitizada, esta medida garantiza que el sustrato no influye en los análisis microbiológicos efectuados a la planta.
3. Por último y no menos importante, una nueva experimentación donde se ha modificado el sustrato, ocupando vermiculita, proporcionaría a la investigación una característica “novedosa”. En las referencias que se han consultado, presentes en la bibliografía, no existe precedente donde se haya utilizado un sustrato similar o igual a la vermiculita, la mayoría de los sustratos que se ocupan para la conformación de las unidades experimentales es tierra proveniente de algún campo de cultivo donde se pretende dar continuación al experimento de manera extensiva. Reiteramos que **el uso de vermiculita como sustrato en una nueva prueba tal vez no genere una investigación nueva, pero sí novedosa**, y que puede dar pie a una posible publicación -la publicación no es objetivo en el trabajo de tesis; sin embargo, es tentativo para un trabajo posterior-.

A manera de conclusión, resaltamos la importancia de una nueva experimentación en la cual, por los argumentos mencionados, se haga un cambio en el tipo de sustrato. Si en el primer experimento con betabel el sustrato ocupado fue tierra extraída de suelo de cultivo, para una nueva experimentación proponemos ocupar vermiculita; la propuesta está justificada por los tres puntos que comentamos antes, pretendemos que el nuevo sustrato por ocupar permita un mayor efecto fertilizante de la orina sobre las plantas.

Capítulo 4

Metodología del experimento final

En el presente capítulo abordaremos la metodología establecida para el último experimento efectuado. Comenzaremos describiendo algunos de los factores relevantes que más incidieron: la orina, el sustrato ocupado para cultivar, el agua de riego, la planta y el espacio físico donde se realizó el experimento, a través de la descripción de estos factores buscamos dar una exposición concreta; sin embargo, aquellos factores que ya hayamos expuesto en las experimentaciones del Capítulo 2 solo serán referenciados. Posteriormente hablaremos de la planeación del experimento; nos enfocaremos en describir variables que son de interés para su adecuada comprensión, así como el diseño experimental ocupado. Finalizaremos con la descripción experimental, se expondrá de manera cronológica el desarrollo del experimento desde su inicio hasta la culminación con la toma de datos para su posterior análisis.

4.1. Metodología para la orina

La metodología ocupada en la orina fue similar a la descrita en la Sección 2.1.

4.2. Metodología para el sustrato

En la Sección 3.5 se comentaron los motivos y justificaciones en la modificación del sustrato para realizar una nueva experimentación. El material que ocupamos como sustrato para el experimento final fue vermiculita, un mineral formado por silicatos de hierro o magnesio, adquirida de manera comercial bajo el nombre de marca “Agrolita”, en presentación de costales de 100 l. La vermiculita fue llevada hasta el espacio físico donde se llevaría a cabo la experimentación para su uso posterior en la formación de las unidades experimentales.

Caracterización

Se llevó a cabo una caracterización físico-química y microbiológica del sustrato con el objetivo de determinar factores que pudieran incidir en el resultado del experimento. Recordemos que dos de los factores predominantes para el uso de vermiculita fue: la ausencia de nitrógeno (debido a su composición química) y la ausencia de materia orgánica.

En el Cuadro 4.1 se presentan los parámetros determinados con su respectiva metodología. Los análisis físico-químicos estuvieron a cargo del Mtro. Cesar Calderón Fabián, perteneciente al DICA, mientras que los análisis microbiológicos estuvieron a cargo de la tesista Sandra Cortés Domínguez, perteneciente a la FCQ.

Cuadro 4.1: Parámetros determinados en el sustrato bajo su respectiva metodología.

| Parámetro | Método |
|-------------------------|-------------------|
| pH | NMX-AA-008 |
| Materia orgánica | AS-07 |
| Densidad aparente | - |
| Conductividad eléctrica | Conductímetro |
| Calcio | Método EDTA |
| Magnesio | Método EDTA |
| Sodio | Flamometría |
| Potasio | Flamometría |
| Fósforo | NMX-AA-029 |
| Nitrógeno | NMX-AA-079 |
| Fe | AA |
| Cu | AA |
| Mn | AA |
| Zn | AA |
| Coliformes | NOM 112-SSA1-1994 |
| BMA | NOM 092-SSA1-1994 |
| Samonella | NOM 114-SSA1-1994 |
| Mohos y levaduras | NOM 111-SSA1-1994 |

4.3. Metodología para el agua

Obtención

El agua ocupada en las experimentaciones provenía del suministro de agua potable brindado a la universidad. El agua es almacenada en una cisterna y posteriormente bombeada a un recipiente de polietileno de 1000 l para su uso inmediato por medio de un grifo o llave de paso ubicada a un costado del invernadero.

Caracterización

Como lo mencionamos en nuestras hipótesis de investigación, parte del trabajo se enfoca en determinar si la orina humana es una fuente inocua de nutrientes para cultivo. En la Sección 1.2 hablamos de la carga microbiológica que puede contener la orina humana, también mencionamos el tratamiento adecuado que se debe efectuar para poder utilizarla. Señalado lo anterior se decidió realizar un análisis microbiológico al agua, para determinar la presencia o ausencia de microorganismos que puedan afectar los resultados del experimento, también se llevó a cabo el análisis de algunos componentes físico-químicos que pudieran influir en los resultados. Los estudios microbiológicos se realizaron en la FCQ a cargo de la tesista Sandra Cortes Domínguez y los estudios físico-químicos en el DICA a cargo del Mtro. Cesar Calderón Fabián. El Cuadro 4.2 muestra los parámetros analizados con su respectiva metodología.

4.4. Metodología para la planta

Se adquirieron de manera comercial 100 plántulas de betabel variedad red pack, con dos semanas posteriores a su germinación, para efectuar la experimentación. En la Sección 2.3 habíamos comentado los motivos principales del uso de plántulas en lugar de germinar las semillas para la conformación de las unidades experimentales; además, el lugar de adquisición del almácigo fue el mismo que se señala en la sección mencionada. Recordemos que uno de los objetivos periféricos de esta nueva experimentación es dar secuencia al primer experimento realizado con

Cuadro 4.2: Parámetros determinados en el agua bajo su respectiva metodología.

| Parámetro | Método |
|--------------------------------------|-------------------|
| pH | NMX-AA-008 |
| Conductividad eléctrica | Conductímetro |
| Calcio (Ca^{2+}) | Método EDTA |
| Magnesio (Mg^{2+}) | Método EDTA |
| Sodio (Na^{1+}) | Flamometría |
| Potasio (K^{1+}) | Flamometría |
| Sulfatos (SO_4^{-2}) | NMX-AA-074 |
| Fosfatos (PO_4^{-3}) | NMX-AA-029 |
| Carbonatos (CO_3^{-2}) | Volumetría |
| Bicarbonatos (HCO_3^{-1}) | Volumetría |
| Cloruros (Cl^{-1}) | NMX-AA-073 |
| Coliformes | NOM 112-SSA1-1994 |
| BMA | NOM 092-SSA1-1994 |
| Samonella | NOM 114-SSA1-1994 |
| Mohos y levaduras | NOM 111-SSA1-1994 |

plantas de betabel (Sección 2.4), pero modificando sólo la variable sustrato, por tal motivo para generar cada una de las unidades experimentales procedimos de manera similar a lo hecho en la Sección 2.4.

Caracterización

Similar a lo comentado en la caracterización del sustrato y el agua, se efectuaron los análisis químicos, físicos y microbiológicos en las plantas, Cuadro 4.3; el objetivo fue determinar factores que pudieran influir en los resultados de los experimentos, así mismo la existencia de microorganismos que incidieran en la posible inocuidad de la orina. Los estudios microbiológicos se realizaron en la FCQ y los estudios físico-químicos en el DICA.

Cuadro 4.3: Parámetros determinados en la plántula bajo su respectiva metodología.

| Parámetro | Método |
|-------------------|-------------------|
| Calcio | Método EDTA |
| Magnesio | Método EDTA |
| Sodio | Flamometría |
| Potasio | Flamometría |
| Nitrógeno | NMX-AA-079 |
| Fósforo | NMX-AA-029 |
| Fe | AA |
| Cu | AA |
| Mn | AA |
| Zn | AA |
| Coliformes | NOM 112-SSA1-1994 |
| BMA | NOM 092-SSA1-1994 |
| Samonella | NOM 114-SSA1-1994 |
| Mohos y levaduras | NOM 111-SSA1-1994 |

4.5. Metodología de la experimentación

Lugar de experimentación

El lugar utilizado para realizar el experimento fue un invernadero ubicado dentro de las instalaciones de la BUAP. Las especificaciones particulares ya fueron comentadas en la Sección 2.4.

Planeación del experimento

Se llevó a cabo un experimento:

- **El experimento consistió en:** aplicar orina humana fermentada (Sección 2.1) en diferentes estratos de tiempo y en concentraciones de 0, 30, 60, 120 y 240 kg N ha⁻¹ a plantas de betabel (variedad red pack) cultivadas en macetas (ocupando el sustrato de la Sección 4.2) dentro de un invernadero de la BUAP durante el 14 de junio al 14 de agosto de 2018.

Para especificar el experimento definiremos los siguientes conceptos clave en el diseño.

Unidad experimental

Se tomo como unidad experimental el objeto constituido por: la planta de betabel, el sustrato y la maceta (macetas del número 8 con diámetro superior de 28 cm, diámetro inferior 21 cm y altura de 25 cm). Es decir, la unidad experimental es el objeto conformado por: la planta (de betabel), el sustrato ocupado para el cultivo de la planta (vermiculita, Sección 4.2) y la maceta que contiene a los dos primeros, Figura 4.1.

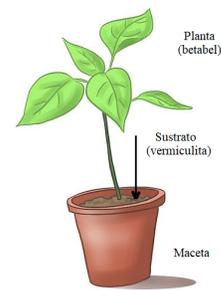


Figura 4.1: Imagen esquemática representando la unidad experimental.

Variable(s) de respuesta

Para efectos de los resultados que buscamos en esta nueva experimentación se determinó elegir solo una variable de respuesta, esta variable es de tipo cuantitativa, siendo la que mejor refleja y caracteriza el objeto de estudio. En el diseño experimental se consideró la siguiente variable de respuesta:

- Peso de la planta.

Factor de estudio

Dado que para esta nueva experimentación se sigue manteniendo la hipótesis establecida en la Sección 1.5: la orina humana fermentada es un líquido higiénico que en concentraciones de 0, 30, 60, 120 y 240 kg N ha⁻¹ **estimula en forma diferente el desarrollo vegetativo** (peso) de betabel cultivado en macetas, haber establecido como único factor de estudio la cantidad de orina fermentada, nos permitirá hacer una mejor distinción sobre el efecto que pueda tener cada cantidad respecto al desarrollo vegetativo en cada unidad experimental.

Se propuso un único factor de estudio:

- **La cantidad de OHF** colocada a cada una de las unidades experimentales

Niveles del factor de estudio

En el diseño experimental se propusieron los siguientes niveles del factor de estudio:

4.5 Metodología de la experimentación

- 0 kg N ha⁻¹ (equivalente a 0 lts de OHF o a 0 g N).
- 30 kg N ha⁻¹ (equivalente a 0.0415 lts de OHF o a 0.181 g N).
- 60 kg N ha⁻¹ (equivalente a 0.0831 lts de OHF o a 0.363 g N).
- 120 kg N ha⁻¹ (equivalente a 0.1663 lts de OHF o a 0.727 g N).
- 240 kg N ha⁻¹ (equivalente a 0.3327 lts de OHF o a 1.456 g N).

Tratamientos

Dada la existencia de un único factor de estudio en el diseño experimental; los niveles del factor de estudio pasan a ser los tratamientos. Daremos nombres a los tratamientos de igual forma como lo hicimos en el primer experimento efectuado en betabel, tratando siempre de hacer las diferencias oportunas para no entrar en confusiones. Los tratamientos aplicados fueron:

- B1** : Se agregó 0 kg N ha⁻¹ de OHF a la unidad experimental a los 0, 15 y 30 días después del trasplante.
- B2** : Se agregó 30 kg N ha⁻¹ de OHF a la unidad experimental dividido equitativamente en tres estratos de tiempo, a los 0, 15 y 30 días después del trasplante¹(equivalente a 0.0138 l de OHF por aplicación).
- B3** : Se agregó 60 kg N ha⁻¹ de OHF a la unidad experimental dividido equitativamente en tres estratos de tiempo, a los 0, 15 y 30 días después del trasplante (equivalente a 0.0276 l de OHF por aplicación).
- B4** : Se agregó 120 kg N ha⁻¹ de OHF a la unidad experimental dividido equitativamente en tres estratos de tiempo, a los 0, 15 y 30 días después del trasplante (equivalente a 0.0553 l de OHF por aplicación).
- B5** : Se agregó 240 kg N ha⁻¹ de OHF a la unidad experimental dividido equitativamente en tres estratos de tiempo, a los 0, 15 y 30 días después del trasplante (equivalente a 0.1106 l de OHF por aplicación).

La aplicación del principio básico de repetición en los tratamientos, dentro del diseño experimental, nos permitirá distinguir mejor qué parte de la variabilidad total de los datos se debe al error aleatorio y cuál a los factores de estudio. En la experimentación que realizamos, basándonos en los precedentes, el conocimiento técnico y práctico del fenómeno, el costo del experimento, el tiempo y la precisión deseada, se determinó replicar 8 veces cada tratamiento, Figura 4.2.

Selección del diseño experimental

Uno de los objetivos secundarios que se perseguía a través de la realización del experimento fue *comparar los diferentes tratamientos* respecto a cómo inferían en el desarrollo vegetativo (peso) de las plantas de betabel. Basándonos en los antecedentes, principalmente los señalados en la Sección 1.5, además del conocimiento técnico y práctico del fenómeno, se determinó proponer solo un único factor de estudio para el diseño experimental, en consecuencia, la comparación de los tratamientos nos permitiría obtener una validación o refutación parcial de las hipótesis de investigación. Por otra parte, *el número de niveles que tiene el factor de estudio, los efectos que nos interesan investigar, el costo del experimento, el tiempo, la precisión deseada y los precedentes* fueron los factores que determinaron la elección del diseño experimental, **un diseño experimental completamente al azar.**

¹De acuerdo con Sene et al. (2012) aplicar la OHF en diferentes tiempos, dentro del periodo de cultivo, mejora la absorción de nutrientes y en consecuencia genera un mayor desarrollo vegetativo. Ver la sección Antecedentes.
Pradhan et al. (2010) y Mnkeni et al. (2008) aplican la OHF en estratos de tiempo similares.

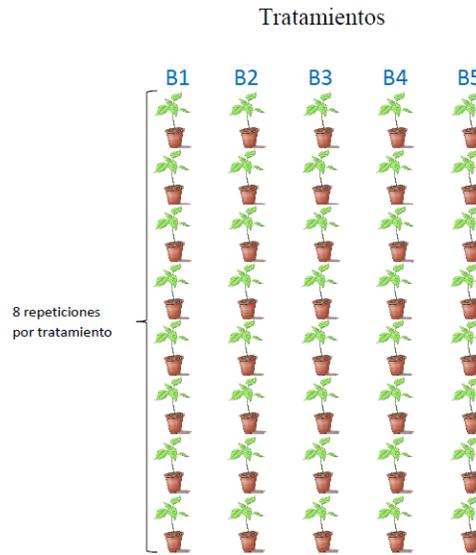


Figura 4.2: Diseño esquemático de los tratamientos y sus repeticiones. (Diseño balanceado)

Descripción experimental

El experimento dio inicio el 14 de junio (al cual denominamos día cero de experimentación) llevando a cabo lo siguiente:

A cada una de las 40 macetas destinadas para el experimento se les colocó de manera uniforme y homogénea 5 l de sustrato (vermiculita). Posteriormente, del almácigo con 100 plántulas de betabel se seleccionaron 40 que presentaran (subjetivamente) un mejor desarrollo vegetativo; el motivo de la selección determinista fue garantizar el trasplante de la plántula, las plántulas con un mejor desarrollo vegetativo presentan un menor estrés al cambio o modificación de su ambiente. Se trasplantó una plántula, de las 40 seleccionadas, por maceta, el procedimiento del trasplante fue similar para cada plántula.

Una vez conformada cada unidad experimental (unidad experimental \equiv planta-sustrato-maceta) se procedió de la siguiente manera para aplicar los tratamientos:

1. Se formaron en línea recta las 40 unidades experimentales.



2. De manera aleatoria se asignaron los tratamientos B1, B2, B3, B4 y B5 a las unidades experimentales.



3. A cada unidad experimental se le agregó 1 ml de solución nutritiva con composición 5 – 15 – 5 (marca comercial: Qfuska foliar), posteriormente a cada una se le aplicó su respectivo tratamiento; la cantidad de orina fue medida con una probeta, diluida en agua en una porción 1 : 4 (1 parte de orina por 4 de agua) y la mezcla fue vertida en la base del tallo de la plántula.

4.5 Metodología de la experimentación

Posterior a los tres puntos anteriores, se procedió a posicionar cada unidad experimental de manera aleatoria dentro del invernadero. Dadas las características físicas del invernadero, especificadas en la Sección 4.5, se distribuyeron al azar las 40 unidades experimentales en 4 filas (Figura 4.3); dos filas se colocaron en el soporte de concreto-este y las otras dos filas se colocaron en el soporte de concreto-oeste.

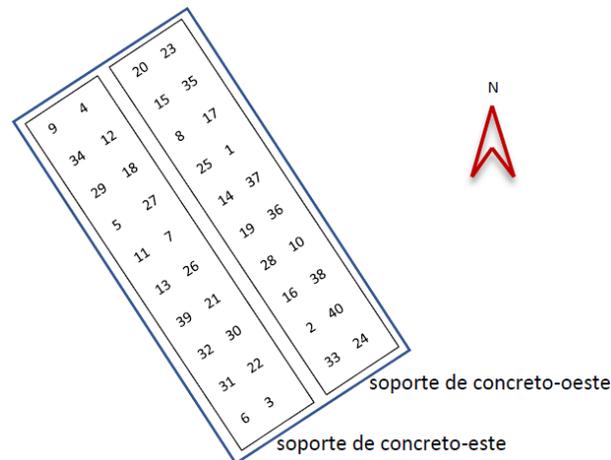


Figura 4.3: Colocación de las unidades experimentales en el invernadero según el diseño experimental completamente al azar, la disposición de los lugares fue generada mediante R a través del programa “agricolae” especificado en De Mendiburu (2017).

Después de la colocación de las unidades experimentales dentro del invernadero, cada planta fue regada con 500 ml de agua (el agua ocupada se señala en la Sección 4.3); el riego fue realizado hacia el sustrato, alrededor de la planta comenzado por el centro y terminando en la orilla de la maceta tratando de evitar los lixiviados, fue colocado un plato de polietileno debajo de cada maceta con el objetivo de recuperar algún lixiviado e inmediatamente volver a agregarlo al sustrato.

Lo descrito anteriormente establece el inicio del experimento; asimismo reiteramos que el día ocupado para la realización de esas actividades lo denominamos día cero de la experimentación (14 de junio). Para los días siguientes se determinó la aplicación de riego de agua cada segundo día bajo la metodología señalada en el párrafo anterior, posterior a la colocación de agua se observó cada una de las unidades experimentales con el objetivo de prevenir y/o controlar alguna enfermedad causada por parásitos u hongos.

Día quince (29 de junio). Se colocó la segunda aplicación de OHF a cada unidad experimental de acuerdo con su correspondiente tratamiento. Al igual que la primera aplicación, llevada a cabo el día cero de la experimentación, se suministró a cada unidad experimental la cantidad correspondiente de orina (medida con una probeta, diluida en agua en una porción 1 : 4 y la mezcla fue vertida en la base del tallo de la plántula), posteriormente se agregó 500 ml de agua.

Día treinta y dos (16 de julio). Se colocó la tercera aplicación de OHF a cada unidad experimental de acuerdo con su correspondiente tratamiento; se suministró la cantidad correspondiente de orina: medida con una probeta, diluida en agua en una porción 1 : 4 y la mezcla fue vertida en la base del tallo de la plántula, posteriormente se agregó 500 ml de agua.

Día sesenta y uno (14 de agosto). Se cosechó cada una de las plantas; con el mayor cuidado posible se extrajo cada planta de su maceta para posteriormente ser pesada y medida.

4.6. Algunas observaciones del experimento

Referente al experimento descrito en la sección anterior mencionamos lo siguiente:

La experimentación tuvo una duración de 62 días; desde la conformación de las unidades experimentales hasta el día de cosecha donde se hicieron las mediciones para determinar los valores de la variable de respuesta.

Resaltamos que en este experimento, en comparación con el primer experimento realizado en betabel, no se tuvo el deceso de alguna planta; en parte por la medida tomada de aplicar 1 ml de solución nutritiva a todas las plantas para poder garantizar un mejor trasplante del almácigo a las macetas; referente a esto hacemos la siguiente observación, la solución nutritiva aplicada tiene una composición especificada en la etiqueta de 5 – 15 – 5, lo cual significa que contiene un 5% de nitrógeno, 15% de fósforo y 5% de potasio, aunque este aporte de macronutrientes es mínimo la cantidad de fosforo permite un menor estrés en la planta garantizando el trasplante.

Para finalizar, presentamos una foto tomada después de cosechar, Figura 4.6, en ella se presentan las plantas de betabel dispuestas en orden secuencial de los tratamientos, B1, B2, B3, B4 y B5. En la imagen que mostramos exhibimos a cada población de plantas sometidas a su respectivo tratamiento; en el extremo izq. el tratamiento B1, a la derecha de este el tratamiento B2, continuamos con el tratamiento B3, después el tratamiento B4 y al extremo derecho el tratamiento B5. A simple vista podemos plantear que el tratamiento B5 presenta un menor desarrollo vegetativo, lo cual significa que “a mayor cantidad de orina aplicada no corresponde un mayor desarrollo de la planta”, también se percibe de manera visual que el tratamiento B4 es posiblemente el tratamiento que proporciona mejores rendimientos.



Figura 4.4: Plantas de betabel sometidas a los tratamientos (de izq. a derecha) B1, B2, B3, B4 y B5.

Capítulo 5

Análisis del experimento final

En este capítulo, al igual que en el Capítulo 3, tenemos por objetivo desarrollar el tercer paso dentro del diseño experimental: el análisis. Iniciando con la caracterización de la orina humana, mostramos aquellos componentes físico-químicos y microbiológicos que fueron determinados; componentes predominantes para efecto de la investigación, tales como el contenido de nitrógeno por litro o la carga microbiológica, que puedan dirigirnos a tomar una resolución sobre las hipótesis planteadas (Sección 1.5). Continuamos con la caracterización del sustrato y del agua, recordemos que el sustrato ocupado para el último experimento fue vermiculita. Ambos análisis efectuados nos servirán para determinar el grado de incidencia que tuvieron el sustrato y el agua en los resultados de la experimentación, ya en la Sección 3.5 habíamos resaltado y justificado la realización de un nuevo experimento ocupando la vermiculita como sustrato –el Cuadro 5.2 brinda un sustento que se puede sumar a la justificación y del cual hablaremos más adelante-.

5.1. Caracterización de la orina humana

Presentamos los resultados de los análisis físico-químicos y microbiológicos hechos a la orina humana fermentada ocupada en la experimentación.

Cuadro 5.1: Parámetros determinados en la OHF.

| Parámetro | Valor | Parámetro | Valor | Parámetro | Valor |
|---------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|--------------------------|-------------------|------------------------|
| pH | 8.94 | Carbonatos (CO_3^{2-}) | 576.0 mg l ⁻¹ | Cu | 0 mg l ⁻¹ |
| Conductividad eléctrica | 31.2 dS m ⁻¹ | Bicarbonatos (HCO_3^{-1}) | 90.0 mg l ⁻¹ | Zn | 0.1 mg l ⁻¹ |
| N-total | 4377.5 mg l ⁻¹ | Sulfatos (SO_4^{2-}) | 710.0 mg l ⁻¹ | Coliformes | Negativo |
| Fosfatos (PO_4^{-3}) | 180.9 mg l ⁻¹ | Cloruros (Cl^{-1}) | 367.5 mg l ⁻¹ | BMA | Negativo |
| Potasio (K^{1+}) | 1860.0 mg l ⁻¹ | Magnesio (Mg^{2+}) | 50.7 mg l ⁻¹ | Samonella | Negativo |
| Calcio (Ca^{2+}) | 289.9 mg l ⁻¹ | Mn | 2.4 mg l ⁻¹ | Mohos y levaduras | Negativo |
| Sodio (Na^{1+}) | 1400.0 mg l ⁻¹ | Fe | 8.9 mg l ⁻¹ | | |

Del Cuadro 5.1 podemos hacer las siguientes observaciones: comencemos por el pH que tiene un valor de 8.94, aunque el valor está ligeramente elevado, para los requerimientos nutricionales del betabel es tolerable; el siguiente parámetro, la conductividad eléctrica, es un reflejo de la cantidad de sales que existen en la orina; su valor está relacionado a la cantidad de sodio que fue determinado; además, se destaca la presencia en buena medida de aquellos componentes indispensables para el desarrollo de cualquier planta, los macronutrientes y los micronutrientes, Sección 1.3; por último, los análisis microbiológicos prueban que la OHF ocupada para la experimentación es un líquido higiénico.

5.2. Caracterización del sustrato

El Cuadro 5.2 muestra la cuantificación de determinados parámetros físico-químicos y microbiológicos analizados en el sustrato ocupado en la experimentación.

Cuadro 5.2: Parámetros determinados en el sustrato.

| Parámetro | Valor | Parámetro | Valor | Parámetro | Valor |
|-------------------------|-------------------------|-----------|-----------------------------|-------------------|---------------------------|
| pH | 6.45 | Potasio | 5331.2 mg kg ⁻¹ | Mn | 326.5 mg kg ⁻¹ |
| Materia orgánica | n/d | Calcio | 6638.3 mg kg ⁻¹ | Zn | 81.6 mg kg ⁻¹ |
| Densidad aparente | 0.14 g m ⁻¹ | Magnesio | 22890.8 mg kg ⁻¹ | Coliformes | Negativo |
| Conductividad eléctrica | 0.42 dS m ⁻¹ | Sodio | 78302.0 mg kg ⁻¹ | BMA | Negativo |
| Nitrógeno | n/d | Fe | 54411.5 mg kg ⁻¹ | Samonella | Negativo |
| Fósforo | n/d | Cu | 31.6 mg kg ⁻¹ | Mohos y levaduras | Negativo |

Si examinamos algunos de los parámetros determinados y cuantificados podremos tener una idea preliminar de la relevancia en el uso de este tipo de sustrato (vermiculita) para la experimentación. Comenzando con el pH de 6.45, valor ubicado por debajo del de la orina, no interfiere con la capacidad de absorción de nutrientes de las plantas. Uno de los aspectos constitutivos de mayor relevancia del sustrato (mencionado en las Secciones 3.5 y 4.2) es la no presencia de materia orgánica; la materia orgánica en sustratos de cultivo favorece la presencia de microorganismos fijadores de nitrógeno en plantas y hongos generadores de micorrizas, por ejemplo algunas bacterias que pertenecen al orden Rhizobiales y algunos hongos de la división Basidiomycota.

5.3. Caracterización del agua

Al igual que la orina y el sustrato, se realizaron análisis al agua ocupada para riego buscando determinados parámetros relevantes para la investigación. Los resultados de dichos análisis se presentan a continuación, Cuadro 5.3.

Cuadro 5.3: Parámetros determinados en el agua.

| Parámetro | Valor | Parámetro | Valor | Parámetro | Valor |
|---|-------------------------|--|--------------------------|-------------------|----------|
| pH | 7.10 | Calcio (Ca ²⁺) | 130.4 mg l ⁻¹ | BMA | Negativo |
| Conductividad eléctrica | 1.25 dS m ⁻¹ | Magnesio (Mg ²⁺) | 26.0 mg l ⁻¹ | Samonella | Negativo |
| Cloruros (Cl ⁻¹) | 84.0 mg l ⁻¹ | Sulfatos (SO ₄ ⁻²) | 232.0 mg l ⁻¹ | Mohos y levaduras | Negativo |
| Fosfatos (PO ₄ ⁻³) | 2.6 mg l ⁻¹ | Carbonatos (CO ₃ ⁻²) | 25.6 mg l ⁻¹ | | |
| Potasio (K ¹⁺) | 13.4 mg l ⁻¹ | Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻¹) | 366.0 mg l ⁻¹ | | |
| Sodio (Na ¹⁺) | 94.3 mg l ⁻¹ | Coliformes | Negativo | | |

Recordemos que parte de nuestra hipótesis de investigación es probar que la orina humana fermentada es una fuente inocua de nutrientes para algunas plantas de cultivo, he ahí un motivo por el cual es necesario un estudio microbiológico a algunos de los factores que participan en el cultivo de la planta, en particular el agua utilizada para riego. En el estudio realizado se buscaba determinar la ausencia o presencia y cantidad de unidades formadores de colonia según la Norma Oficial Mexicana, por ejemplo, microorganismos como bacterias coliformes, bacterias mesófilas aerobias (BMA) y salmonella, además de mohos y levaduras.

5.4. Gráficas y ANOVA

Tras la ejecución del último experimento se recabaron datos; precisamente aquellos valores obtenidos mediante la única variable de respuesta, peso de planta. Lo que haremos ahora será presentar esos datos de una manera que pueda facilitarnos su análisis mediante el seguimiento del modelo de ANOVA unifactorial.

Sea Y_{ij} la variable aleatoria que denota el valor de la variable de respuesta respecto a la unidad experimental j sometida al tratamiento B_i , es decir, la variable aleatoria Y_{ij} representa el peso de la planta que conforma la unidad experimental j sometida al tratamiento B_i , donde $j = 1, \dots, 8$ e $i = 1, \dots, 5$ (Tabla izquierda en el Cuadro 5.4). La Tabla derecha en el Cuadro 5.4 son los valores de la variable de respuesta obtenidos del experimento.

Cuadro 5.4: Datos obtenidos del segundo experimento en betabel.

| Tratamientos | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Y_{11} | Y_{21} | Y_{31} | Y_{41} | Y_{51} |
| | Y_{12} | Y_{22} | Y_{32} | Y_{42} | Y_{52} |
| | Y_{13} | Y_{23} | Y_{33} | Y_{43} | Y_{53} |
| V.A's. que modelan la variable de respuesta | Y_{14} | Y_{24} | Y_{34} | Y_{44} | Y_{54} |
| | Y_{15} | Y_{25} | Y_{35} | Y_{45} | Y_{55} |
| | Y_{16} | Y_{26} | Y_{36} | Y_{46} | Y_{56} |
| | Y_{17} | Y_{27} | Y_{37} | Y_{47} | Y_{57} |
| | Y_{18} | Y_{28} | Y_{38} | Y_{48} | Y_{58} |

| Tratamientos | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 |
|--------------------------------------|-----|------|------|-------|-------|
| | 0.6 | 17.5 | 74.9 | 112.2 | 9.40 |
| | 1.6 | 32.4 | 55.0 | 120.3 | 3.90 |
| | 1.0 | 36.0 | 63.9 | 140.8 | 1.05 |
| Realizaciones de las V.A's. Y_{ij} | 1.8 | 33.1 | 82.1 | 160.5 | 35.30 |
| | 0.6 | 43.0 | 92.0 | 95.0 | 39.00 |
| | 1.1 | 38.1 | 78.8 | 115.5 | 36.70 |
| | 0.2 | 6.0 | 58.6 | 109.2 | 26.10 |
| | 1.3 | 15.4 | 17.9 | 104.7 | 9.90 |

Usando los valores del lado derecho del Cuadro 5.4 generamos las gráficas de las Figuras 5.1 y 5.2. La gráfica de cajas presentada nos proporciona un examen visual de los datos obtenidos a través del experimento final. En la dispersión horizontal de las cajas se destaca el tratamiento B3 y B4 correspondientes a las cajas ubicadas al extremo derecho; en consecuencia, dada la no imbricación de las cajas podemos inferir la existencia de efecto de tratamientos para la variable de respuesta peso de planta.

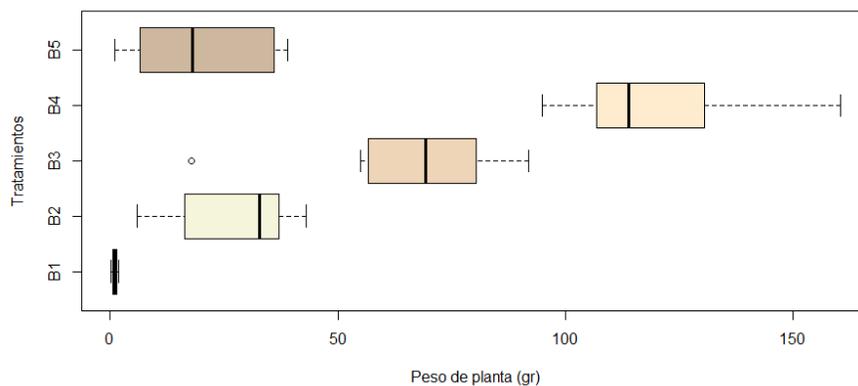


Figura 5.1: Rendimiento (en peso) de betabel sujeto a distintos tratamientos.

La gráfica de intervalos de confianza para las medias de la Figura 5.2 valida la inferencia de existir efecto de tratamientos; más aún, podemos afirmar que el tratamiento B4 fue el nivel óptimo de fertilización, además, el tratamiento B5, nivel de mayor fertilización, presenta un menor rendimiento en peso.

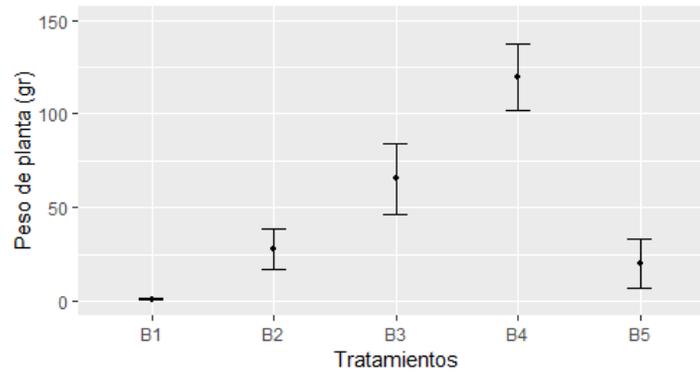


Figura 5.2: Intervalos de confianza al 95% para las medias de los tratamientos.

Se propuso el siguiente modelo para el análisis del experimento:

$$Y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij}, \text{ con } j = 1, \dots, 8 \text{ e } i = 1, \dots, 5,$$

donde:

- Y_{ij} es la variable aleatoria que representa el valor de la variable de respuesta respecto a la unidad experimental j sometida al tratamiento i (Cuadro 5.4).
- μ_i es la respuesta promedio al tratamiento B_i .
- ε_{ij} es la variable aleatoria que representa el error atribuible a la medición Y_{ij} .

Observemos que el modelo propuesto es el adecuado para el ANOVA en un diseño completamente al azar, recordemos que en este tipo de diseño experimental la variabilidad de las observaciones solo se debe a los tratamientos y al error aleatorio.

Para validar la suposición de normalidad de los residuos se realizó la prueba de Kolmogórov-Smirnov, además del gráfico Q-Q de la Figura 5.3, obteniendo el p -valor, $p = 0.1802$. La prueba gráfica y la prueba analítica validan el supuesto de normalidad de los residuos.

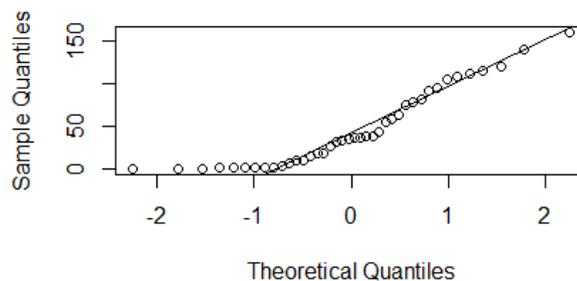


Figura 5.3: Normal Q-Q plots para los datos del segundo experimento con betabel.

La prueba de Fligner-Killeen para la homogeneidad de las varianzas dio el p -valor, $p = 0.1185$; en consecuencia, no hay evidencia significativa para afirmar que las varianzas difieren.

Dado que las funciones necesarias para ejecutar el ANOVA están programadas en R, optamos por ocupar este software junto con el programa “agricolae” (De Mendiburu, 2017), obteniendo lo siguiente:

- Respecto a la variable de respuesta peso de planta, el análisis de la varianza demostró la existencia de efecto de tratamientos, ya que $p = 1.45 \times 10^{-15}$.

5.5 Inferencias sobre la experimentación

Dada la existencia de una diferencia significativa entre los tratamientos, el siguiente paso es determinar dónde se encuentra esa diferencia; mediante R y específicamente la referencia De Mendiburu (2017), aplicamos el procedimiento de Tukey ($\alpha = 0.05$) para determinar las variaciones que existen entre los diferentes tratamientos¹.

Cuadro 5.5: Los tratamientos con la misma letra no son significativamente diferentes.

| Tratamiento | Peso promedio | Grupos |
|-------------|---------------|--------|
| B4 | 119.77500 | a |
| B3 | 65.40000 | b |
| B2 | 27.68750 | c |
| B5 | 20.16875 | cd |
| B1 | 1.02500 | d |

Para finalizar mostramos la prueba de Tukey de manera gráfica, las parejas cuyos intervalos de confianza intercepten el eje vertical en cero no son significativamente diferentes.

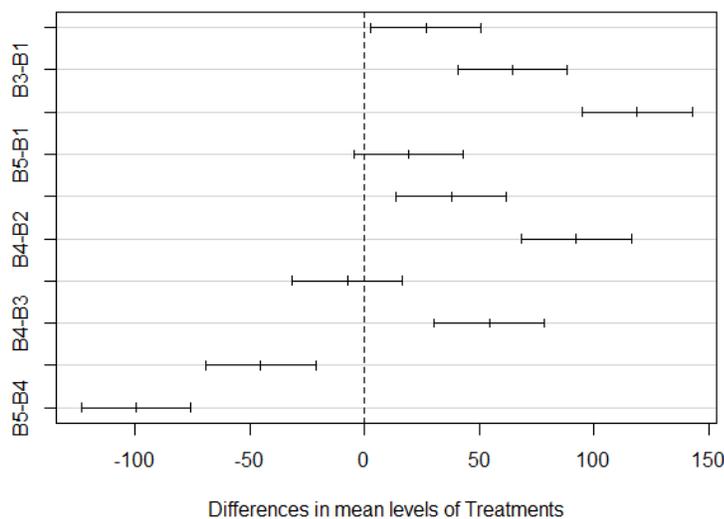


Figura 5.4: Prueba de Tukey con intervalos de confianza al 95 %.

5.5. Inferencias sobre la experimentación

Si recordamos la segunda hipótesis planteada en la Sección 1.5, habíamos supuesto que la orina humana fermentada es un líquido higiénico que en concentraciones de 0, 30, 60, 120 y 240 kg N ha⁻¹ estimula en forma diferente el desarrollo vegetativo (peso) de betabel cultivado en maceta.

En este trabajo de tesis hemos expuesto dos experimentaciones con betabel, la primera en el Capítulo 2 y la segunda en el Capítulo 4, obteniendo resultados satisfactorios de ambos; y es que ambos experimentos brindan una respuesta afirmativa a la hipótesis de investigación planteada, más aún, el análisis presentado en la sección anterior reitera al tratamiento B4 como aquel que proporciona un mejor rendimiento en peso, Cuadro 5.5.

¹Para fines prácticos se expuso solamente el p -valor y la tabulación de los tratamientos en grupos; en el Apéndice A presentamos las salidas del programa para cada una de las pruebas realizadas, Cuadros A.16 y A.17.

Capítulo 6

Conclusiones

A través de la teoría del diseño de experimentos se plantearon inicialmente dos pruebas para entender el efecto de aplicar cantidades específicas de orina humana fermentada a cultivos de lechuga y betabel; cada prueba, realizada por separado, pretendía determinar en qué cantidades equivalentes de nitrógeno en la orina fermentada se puede estimular el desarrollo vegetativo de las plantas sometidas a su respectivo tratamiento.

En cultivo de lechuga no obtuvimos los resultados esperados. Después de haber ejecutado el experimento, los datos obtenidos a través de las mediciones que cuantifican cada una de las variables de respuesta fueron analizados mediante el ANOVA unifactorial, obteniendo los siguientes p -valores:

- El análisis de la varianza respecto a la variable de respuesta ancho dio el p -valor, $p = 0.308$.
- El análisis de la varianza respecto a la variable de respuesta longitud de hoja dio el p -valor, $p = 0.412$.
- El análisis de la varianza respecto a la variable de respuesta peso de planta dio el p -valor, $p = 0.258$.

Dado que cada p -valor está por arriba de algún nivel de significancia aceptable (0.001, 0.01, 0.05 y 0.1), no existe suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula a favor de la hipótesis alternativa (en el juego de hipótesis del análisis de la varianza), donde la hipótesis nula supone una igualdad en la respuesta promedio de los tratamientos, mientras que la hipótesis alternativa supone que al menos dos respuestas promedio a los tratamientos difieren. Por tanto, **no podemos afirmar la existencia de efecto de tratamientos en el experimento desarrollado con plantas de lechuga.**

Por otra parte, **en las experimentaciones realizadas en cultivo de betabel**, donde el segundo experimento se produjo como secuenciación del primero, **se generaron los resultados necesarios para poder afirmar que la orina utilizada ejerció un efecto distinto en el peso de las plantas dependiendo de su respectivo tratamiento.**

A diferencia del primer experimento con betabel, el segundo tuvo una variación en el sustrato ocupado; la justificación del cambio de sustrato es un tema del cual ya hemos hecho mención (Sección 3.5), sin embargo, resaltamos una de las hipótesis que planteamos: la vermiculita favorecería observar con mayor claridad el efecto fertilizante de la orina humana fermentada. Cuando se efectuó el análisis de la varianza para la segunda experimentación en betabel obtuvimos el siguiente p -valor, $p = 1.45 \times 10^{-15}$, mucho menor que el p -valor obtenido del primer experimento, $p = 0.000199$; en consecuencia, existe un efecto de tratamientos altamente significativo.

Además, en la primera experimentación con betabel solo se formaron dos grupos con diferencias significativas (Cuadro 3.6), el primer grupo incluía únicamente al **tratamiento B4 el cual tuvo un mayor rendimiento en peso**

y el segundo grupo que incluía a los tratamientos B2, B5, B3 y B1 (escritos en orden de mayor a menor rendimiento en peso). Sin embargo, los resultados de la segunda prueba en betabel generaron 4 grupos con diferencias significativas (Cuadro 5.5), y de nuevo el tratamiento B4 proporciono un mayor rendimiento en peso; más aún, los resultados obtenidos de ambos experimentos con betabel nos permiten garantizar que **la aplicación de orina como fertilizante no genera una relación proporcional con el crecimiento de las plantas**, es decir, incrementar la cantidad de orina por aplicar no producirá un mayor rendimiento en cultivo. Podemos plantear como una pregunta abierta si los mismos resultados prevalecerán en pruebas a cielo abierto.

Parte de los objetivos que perseguimos con la elaboración de la tesis fue generar ideas que tuvieran la capacidad de poder ser exportadas y aplicadas; la idea subyacente radica en hacer un aporte al cambio de paradigma en la agricultura convencional a través de poder utilizar nuevos medios de fertilización para determinadas plantas comestibles, las experimentaciones realizadas en plantas de betabel nos brindan la certeza que bajo determinadas características (características que incidieron en el diseño de los experimentos) podemos afirmar que la orina (específicamente la que ocupamos) en determinada cantidad, equivalente en kilogramos de nitrógeno por hectárea, favorece el desarrollo vegetativo de las plantas dando un mayor rendimiento en peso. Si bien cada una de las pruebas realizadas están constreñidas a específicas metodologías: cultivo en macetas, uso de invernadero y riego controlado entre otras, los resultados que obtuvimos nos brindan una idea de hacia dónde dirigir futuras investigaciones que puedan ir acercándose a situaciones más reales. Más aun, continuando con la coyuntura entre experimentaciones a cielo abierto y en invernadero, los experimentos llevados a cabo en el presente trabajo están caracterizados por su objetividad, con lo cual garantizamos que puedan replicarse, y a esto nos referimos cuando mencionamos la generación de ideas que puedan ser exportadas.

Bibliografía

- [1] Akpan-Idiok, A. U., Udo, I. A. y Braide, E. I. (2012). The use of human urine as an organic fertilizer in the production of okra (*Abelmoschus esculentus*) in South Eastern Nigeria. *Resources, Conservation and Recycling*, 62, 14-20.
- [2] Álvarez Elizalde, Arturo (2011). *Aplicación de orina humana en suelo de uso agrícola. Efecto en la capacidad de intercambio catiónico* (tesis de pregrado). Facultad de Química, UNAM.
- [3] Amoah, P., Adamtey, N. y Coffe, O. (2017). Effect of Urine, Poultry Manure, and Dewatered Faecal Sludge on Agronomic Characteristics of Cabbage in Accra, Ghana. *Resources*, 6(19), 1-14.
- [4] Ávila, J. A. (2001). El mercado de los fertilizantes en México. Situación actual y perspectivas. *Problemas del Desarrollo*, 32(127), 189-207.
- [5] Badii, M. H., Castillo, J., Rodríguez, M., Wong, A., y Villalpando, P. (2007). Diseños experimentales e investigación científica. *Innovaciones de Negocios*, 4(2), 283-330.
- [6] Casella, G. y Berger, R., (2002), *Statistical Inference*, Brooks/cole, Cengage Learning.
- [7] Chandran, A., Pradhan, S. K. y Heinonen-Tanski, H. (2009). Survival of enteric bacteria and coliphage MS2 in pure human urine. *Journal of Applied Microbiology*, 107, 1651-1657.
- [8] Concha Santos, Sibila (2012). *Efecto de la aplicación de la orina humana como fertilizante en suelo ácido y neutro en el cultivo de jitomate* (tesis de maestría). UNAM.
- [9] Conover, W. J., (1999), *Practical Nonparametric Statistics*, John Wiley and Sons.
- [10] De Mendiburu, Felipe, (2017). *Statistical Procedures for Agricultural Research*. <https://cran.r-project.org/web/packages/agricolae/index.html>
- [11] De Mendiburu, Felipe, (2009). *Una herramienta de análisis estadístico para la investigación agrícola*. Universidad Nacional de Ingeniería (UNI-PERU).
- [12] Fatunbi, A. O. (2009). Suitability of Human Urine Enriched Compost as Horticultural Growing Medium. *World Applied Sciences Journal*, 6(5), 637-643.
- [13] Gómez, K. A., y Gómez, A. A., (1984), *Statistical procedures for agricultural research*, John Wiley and Sons.
- [14] González Pérez, Laura Alexandra y Zepeda López, Adan (2013). *Rendimiento de cinco variedades de lechuga tipo gourmet ciclo primavera-verano* (tesis de pregrado). Facultad de agronomía y veterinaria, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

- [15] Gregorio Méndez, Judith (2010). *Producción orgánica de betabel (Beta bulgaris L): evaluación de variedades y efecto de dos compostas* (tesis de pregrado). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro División de Agronomía.
- [16] Guadarrama, R. O., Pichardo, N. O. y Morales-Oliver, E. (2002). Urine and compost efficiency applied to lettuce cultivation under greenhouse conditions in Temixco, Morelos, México. *First International Conference on Ecological Sanitation*.
- [17] Gutiérrez, H. y de la Vara, R., (2012), *Análisis y diseño de experimentos*, McGraw-Hill.
- [18] Guyton, A. y Hall, J., (2011), *Tratado de fisiología médica*, Elsevier.
- [19] Hinkelmann, K. y Kempthorne, O., (2008), *Design and Analysis of Experiments Volume 1*, John Wiley and Sons.
- [20] Heinonen-Tanski, H., Sjöblom, A., Fabritius, H., y Karinen, P. (2007). Pure human urine is a good fertiliser for cucumbers. *Bioresource technology*, 98(1), 214-217.
- [21] Höglund, C., Ashbolt, N. y Stenström, N. A. (2002). Microbial risk assessment of source-separated urine used in agriculture. *Waste Management and Research*, 20(3), 151-161.
- [22] Höglund, C., Ashbolt, N., Stenström, N. A. y Svensson, L. (2002). Viral persistence in source-separated human urine. *Advances in Environmental Research*, 6, 265-275.
- [23] Hu, M., Fan, B., Wang, H., Qu, B. y Zhu, S. (2016). Constructing the ecological sanitation: a review on technology and methods. *Journal of Cleaner Production*, 125, 1-21.
- [24] INSTITUTO MEXICANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN, A.C. (2007), NMX-FF-109-SCFI-2007. Sitio web: <http://www.economia-nmx.gov.mx/normas/nmx/2007/nmx-ff-109-scfi-2008.pdf>
- [25] INSTITUTO MEXICANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN, A.C. (2000), NOM-021-SEMARNAT-2000. Sitio web: <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/rn/rn021-02.pdf>
- [26] INSTITUTO MEXICANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN, A.C. (2002), NOM-230-SSA1-2002. Sitio web: http://dof.gob.mx/nota_to_doc.php?codnota=691563
- [27] Jönsson, H., Stintzing, A. R., Vinnerås, B. y Salomon, E., (2004), *Lineamientos para el Uso de la Orina y de las Heces en la Producción de Cultivos*, Stockholm Environment Institute, EcoSanRes Programme.
- [28] Karak, T., y Bhattacharyya, P. (2011). Human urine as a source of alternative natural fertilizer in agriculture: A flight of fancy or an achievable reality. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(4), 400-408.
- [29] Kirchmann, H. y Pettersson, S. (1995). Human urine - Chemical composition and fertilizer use efficiency. *Fertilizer Research*, 40, 149-154.
- [30] Kutu, F. R., Muchaonyerwa, P. y Mnkeni, P. N. S. (2010). Complementary nutrient effects of separately collected human faeces and urine on the yield and nutrient uptake of spinach (*Spinacia oleracea*). *Waste Management and Research*, 29(5), 532-539.
- [31] Larsen, T. A. y Gujer, W. (1996). Separate management of anthropogenic nutrient solutions (human urine). *Water Science and Technology*, 34(3-4), 87-94.
- [32] Lehninger, A. L., (1978), *Bioquímica. Las bases moleculares de la estructura y función celular*, Ediciones Omega.

- [33] Maas, E. V. (1984). Crop tolerance. *California Agriculture*, 38(10), 20-21.
- [34] Mainardi, F. F., (1978), *Hortalizas de bulbo, raíz y tubérculo*, Editorial de Vecchi, Barcelona, España.
- [35] Mamani, V., Loza, M., Coronel, L., Sainz, H., Paye, V. y Coronel, F. (2015). Uso de la orina humana como fertilizante en la producción de lechuga Waldmann Green (*Lactuca sativa* L.). *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 3(1), 24-38.
- [36] Maurer, M., Schwegler, P. y Larsen, T. A. (2003). Nutrients in urine: energetic aspects of removal and recovery. *Water Science and Technology*, 48(1), 37-46.
- [37] Mnkeni, P. N. S., Kutu, F. R., Muchaonyerwa, P. y Austin, L. M. (2008). Evaluation of urine as a source of nutrients for selected vegetables and maize under tunnel house conditions in the Eastern Cape, South Africa. *Waste Management and Research*, 26, 132-139.
- [38] Montgomery, D., (2001), *Design and analysis of experiments*, John Wiley and Sons.
- [39] Mugivhisa, L. L. y Olowoyo, J. O. (2017). Accumulation pattern of trace metals in *Spinacia oleracea* harvested from soil treated with urine in comparison with other soil amendments in Pretoria, South Africa. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 6, 133-141.
- [40] Nagy, J. y Zseni, A. (2017). Human urine as an efficient fertilizer product in agriculture. *Agronomy Research*, 15(2), 490-500.
- [41] Pradhan, S. K., Holopainen, J. K., y Heinonen-Tanski, H. (2009). Stored human urine supplemented with wood ash as fertilizer in tomato (*Solanum lycopersicum*) cultivation and its impacts on fruit yield and quality. *Journal of agricultural and food chemistry*, 57(16), 7612-7617.
- [42] Pradhan, S. K., Holopainen, J. K., Weisell, J. y Heinonen-Tanski, H. (2010). Human Urine and Wood Ash as Plant Nutrients for Red Beet (*Beta vulgaris*) Cultivation: Impacts on Yield Quality. *Journal of agricultural and food chemistry*, 58, 2034-2039.
- [43] Preciado, R. P., Fortis, H. M., García, H. L., Cruz, L. E., Meza, V. A. y Esparza, R. R. (2015). Producción de plántulas de chile jalapeño fertilizadas con orina. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(7), 1481-1489.
- [44] Preciado, R. P., Torres, A. G., Segura-Castruita, M. A., Fortis-Hernández, M., García-Hernández, J. L., Rueda-Puente, E.O. y Sánchez-Chávez, E. (2010). Evaluación de la orina humana como fuente de nutrientes en la producción de plántulas de tomate. *Universidad y ciencia Trópico húmedo*, 26(2), 171-178.
- [45] Ranasinghe, E. S. S., Karunarathne, C. L. S. M., Beneragama, C. K. y Wijesooriya, B. G. G. (2016). Human urine as a low cost and effective nitrogen fertilizer for bean production. *Procedia Food Science*, 6, 279-282.
- [46] Reyes Arana, Ricardo Augusto (2017). *Manejo y reutilización de la orina humana como fertilizante en plantas de maíz* (tesis de maestría). Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- [47] Richert, A., Gensch, R., Jönsson, H., Stenström, T. y Dagerskog, L., (2011), *Guía Práctica de Uso de la Orina en la Producción Agrícola*, Stockholm Environment Institute, EcoSanRes Programme.
- [48] Rose, C., Parker, A., Jefferson, B., y Cartmell, E. (2015). The characterization of feces and urine: a review of the literature to inform advanced treatment technology. *Critical reviews in environmental science and technology*, 45(17), 1827-1879.

-
- [49] Schönning, C., Leeming, R. y Stenström, T. A. (2002). Faecal contamination of source-separated human urine based on the content of faecal sterols. *Water Research*, 36(8), 1965-1972.
- [50] Schönning, C. y Stenström, T., (2004), *Guidelines on the Safe Use of Urine and Faeces in Ecological Sanitation Systems*, Stockholm Environment Institute, EcoSanRes Programme.
- [51] Sene, M., Hijikata, N., Ushijima, K., y Funamizu, N. (2012). Adequate human urine application pattern for agriculture. *International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science*, 2(1), 038-045.
- [52] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SAGARPA, 2016). Betabel, un vegetal con mucha historia. Sitio web: <https://www.gob.mx/sader/es/articulos/betabel-un-vegetal-con-mucha-historia>
- [53] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Sitio web: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- [54] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Monografías de productos agroalimentarios mexicanos. Sitio web: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166465/lechuga_monograf_a.pdf
- [55] Silva Norman, Azucena (2012). *Efecto de la dosificación de orina y heces como fuente de nutrientes en el cultivo de jitomate* (tesis de pregrado). Facultad de Estudios Superiores de Zaragoza, UNAM.
- [56] Valadez, A., (1994), *Producción de hortalizas*, Uthea, Noriega Editores D.F., México.

Apéndice A

Tablas obtenidas mediante el análisis de la varianza

La siguiente sección tiene por objetivo mostrar las tablas del análisis realizado a cada una de las experimentaciones presentadas en la tesis, cada uno de los cuadros que se presentaran a continuación son respectivamente las salidas proporcionadas por el software R y el programa “agricolae” tras la ejecución de las pruebas.

Comenzamos con las salidas de las pruebas en la experimentación con lechuga.

Cuadro A.1: Prueba de Kolmogorov-Smirnov para la variable de respuesta ancho de hoja.

```
> by(data = datos.frame, INDICES = datos.frame$Treatments, FUN = function(x){  
  lillie.test(x$ancho)})
```

Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) normality test

```
data: x$ancho  
D = 0.25538, p-value = 0.1293
```

Cuadro A.2: Prueba de Fligner-Killeen para la variable de respuesta ancho de hoja.

```
> fligner.test(ancho ~ Treatments, datos.frame)
```

Fligner-Killeen test of homogeneity of variances

```
data: ancho by Treatments  
Fligner-Killeen:med chi-squared = 3.9972, df = 3, p-value = 0.2618
```

Cuadro A.3: Tabla ANOVA generada en la experimentación con lechuga para la variable de respuesta ancho de hoja.

```
> summary(aov(ancho) #Tabla ANOVA  
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)  
Treatments 3   3024  1008.2    1.258  0.308  
Residuals 28  22435   801.2
```

```
> qf(0.95, 3, 28)  
[1] 2.946685
```

Cuadro A.4: Prueba de Kolmogorov-Smirnov para la variable de respuesta longitud de hoja.

```
> by(data = datos.frame, INDICES = datos.frame$Treatments, FUN = function(x){
  lillie.test(x$longitud)})
  Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) normality test

data: x$longitud
D = 0.14237, p-value = 0.9038
```

Cuadro A.5: Prueba de Fligner-Killeen para la variable de respuesta longitud de hoja.

```
> fligner.test(longitud ~ Treatments, datos.frame)

  Fligner-Killeen test of homogeneity of variances

data: longitud by Treatments
Fligner-Killeen:med chi-squared = 0.61871, df = 3, p-value = 0.8921
```

Cuadro A.6: Tabla ANOVA generada en la experimentación con lechuga para la variable de respuesta longitud de hoja.

```
> summary(aov(longitud) #Tabla ANOVA
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Treatments  3  9524    3175    0.99  0.412
Residuals  28 89771    3206

> qf(0.95 , 3 , 28)
[1] 2.946685
```

Cuadro A.7: Prueba de Kolmogorov-Smirnov para la variable de respuesta peso de planta.

```
> by(data = datos.frame, INDICES = datos.frame$Treatments, FUN = function(x){
  lillie.test(x$P)})
  Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) normality test

data: x$P
D = 0.18077, p-value = 0.6174
```

Cuadro A.8: Prueba de Fligner-Killeen para la variable de respuesta peso de planta.

```
> fligner.test(P ~ Treatments, datos.frame)

  Fligner-Killeen test of homogeneity of variances

data: P by Treatments
Fligner-Killeen:med chi-squared = 4.3935, df = 3, p-value = 0.222
```

Cuadro A.9: Tabla ANOVA generada en la experimentación con lechuga para la variable de respuesta peso de planta.

```
> summary(aov(peso) #Tabla ANOVA
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Treatments  3 16217    5406    1.42  0.258
Residuals  28 106625    3808

> qf(0.95 , 3 , 28)
[1] 2.946685
```

Pasamos ahora a presentar la tabla ANOVA obtenida de la primera experimentación con betabel y la salida del software R para la prueba de Tukey.

Cuadro A.10: Prueba de Kolmogorov-Smirnov para la variable de respuesta peso de planta.

```
> by(data = datos.frame, INDICES = datos.frame$Treatments, FUN = function(x){
  lillie.test(x$peso)})
  Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) normality test

data: x$peso
D = 0.15909, p-value = 0.9051
```

Cuadro A.11: Prueba de Fligner-Killeen para la variable de respuesta peso de planta.

```
> fligner.test(peso ~ Treatments, datos.frame)

  Fligner-Killeen test of homogeneity of variances

data: peso by Treatments
Fligner-Killeen: med chi-squared = 3.4212, df = 4, p-value = 0.49
```

Cuadro A.12: Tabla ANOVA generada en la primera experimentación con betabel para la variable de respuesta peso de planta.

```
> summary(anova.peso) #Tabla ANOVA
              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Treatments    4  25630     6407   8.369 0.000199 ***
Residuals    25  19141       766
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

> qf(0.999, 4, 25)
[1] 6.493059
```

Cuadro A.13: Prueba de Tukey generada en la primera experimentación con betabel.

```
> procedimiento.Tukey <- HSD.test(anova.peso, "Treatments", console=TRUE)
```

```
Study: anova.peso ~ "Treatments"

HSD Test for peso

Mean Square Error: 765.6257

Treatments, means

      peso      std r  Min  Max
B1 49.03333 18.08089 6 30.5 80.7
B2 67.08333 29.63534 6 30.7 112.1
B3 49.90000 25.10984 6 0.0 67.3
B4 125.06667 20.61103 6 90.6 145.3
B5 49.91667 39.59340 6 3.3 114.2

Alpha: 0.05 ; DF Error: 25
Critical Value of Studentized Range: 4.153363

Minimun Significant Difference: 46.91725

Treatments with the same letter are not significantly different.

      peso groups
B4 125.06667    a
B2 67.08333    b
B5 49.91667    b
B3 49.90000    b
B1 49.03333    b
```

Finalizamos presentando las tablas obtenidas de la segunda experimentación con betabel, al igual que las anteriores también se ocupó el software R para realizar los análisis.

Cuadro A.14: Prueba de Kolmogorov-Smirnov para la variable de respuesta peso de planta.

```
> by(data = datos.frame, INDICES = datos.frame$Treatments, FUN = function(x){
  lillie.test(x$peso)})
  Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) normality test

data: x$peso
D = 0.2401, p-value = 0.1906
```

Cuadro A.15: Prueba de Fligner-Killeen para la variable de respuesta peso de planta.

```
> fligner.test(peso ~ Treatments, datos.frame)

  Fligner-Killeen test of homogeneity of variances

data: peso by Treatments
Fligner-Killeen:med chi-squared = 12.885, df = 4, p-value = 0.1185
```

Cuadro A.16: Tabla ANOVA generada en la segunda experimentación con betabel para la variable de respuesta peso de planta.

```
> summary(anova.peso) #Tabla ANOVA
              Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
Treatments    4  70729   17682   63.59 1.45e-15 ***
Residuals   35   9733     278
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

> qf(.99999, 4, 35)
[1] 10.58134
```

Cuadro A.17: Prueba de Tukey generada en la segunda experimentación con betabel.

```
> procedimiento.Tukey <- HSD.test(anova.peso, "Treatments", console=TRUE)

Study: anova.peso ~ "Treatments"

HSD Test for peso

Mean Square Error: 278.0818

Treatments, means

      peso      std r   Min   Max
B1  1.02500  0.5418223  8  0.20  1.8
B2 27.68750 13.0307809  8  6.00 43.0
B3 65.40000 22.8946656  8 17.90 92.0
B4 119.77500 21.1437090  8 95.00 160.5
B5 20.16875 15.7826518  8  1.05 39.0

Alpha: 0.05 ; DF Error: 35
Critical Value of Studentized Range: 4.065949

Minimun Significant Difference: 23.97194

Treatments with the same letter are not significantly different.

      peso groups
B4 119.77500    a
B3 65.40000    b
B2 27.68750    c
B5 20.16875   cd
B1  1.02500    d
```

Apéndice B

Fertilizantes en el campo mexicano

De acuerdo con datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP): En el año 2017 México tuvo una superficie sembrada de 21590574.60 hectáreas (entre cultivos de ciclo: ciclico y perennes; en modalidad de: riego y temporal) lo cual generó un Valor Total de Producción Agrícola (VTPA) de \$587232968480 MN (equivalente al 3.23% del PIB del 2017); siendo el maíz, el aguacate y la caña de azúcar los principales cultivos con mayor importancia económica nacional, Cuadro B.1.

Cuadro B.1: Valor de producción en MN de los diez principales cultivos con mayor importancia económica y su relación con el VTPA y PIB del año 2017.

| Cultivo | Año 2017 | | |
|-------------------|---------------------------|------------|-----------|
| | Valor de producción en MN | % del VTPA | % del PIB |
| Maíz | 109808062660 | 18.69 | 0.6 |
| Aguacate | 39705966220 | 6.76 | 0.21 |
| Caña de azúcar | 38411928280 | 6.59 | 0.21 |
| Chile verde | 29125313730 | 4.95 | 0.16 |
| Tomate rojo | 25483434730 | 4.33 | 0.14 |
| Pastos y praderas | 23002527090 | 3.91 | 0.12 |
| Alfalfa verde | 16878879800 | 2.87 | 0.09 |
| Frijol | 16399040510 | 2.79 | 0.09 |
| Sorgo grano | 15306951790 | 2.60 | 0.08 |
| Agave | 14996383290 | 2.55 | 0.08 |

Dada la importancia que tiene el sector agrícola para la economía y el bienestar social-cultural de la nación es necesario el incremento racional de la producción; desarrollo de procesos productivos sostenibles, insumos y tecnologías que garanticen la soberanía alimentaria de la nación, mejoren la calidad de vida del agricultor, reduzcan las importaciones, mejoren la calidad del producto y disminuyan la contaminación debida a las prácticas agrícolas. Cabe mencionar que la producción agrícola en México depende de manera fundamental de las variables del clima (el 98.9% de las unidades de producción agrícola seleccionadas para el ENA 2017 se cultivan a cielo abierto) y del manejo del cultivo, donde la nutrición juega un papel importante. Los nutrientes que necesitan las plantas se toman del aire y del suelo. Este escrito trata solamente los nutrientes absorbidos del suelo. Si el suministro de nutrientes en el suelo es amplio, los cultivos probablemente crecerán mejor y producirán mayores rendimientos. Sin embargo, si uno de los nutrientes necesarios es escaso, el crecimiento de las plantas será limitado y el rendimiento de cultivo será reducido. En consecuencia, los fertilizantes (o abonos) son un medio para mejorar el rendimiento productivo en la agricultura y útiles para: proveer nutrientes a los cultivos, mejorar la calidad del suelo (restableciendo su composición físico, química y biológica) y hacer más eficiente el consumo de agua para riego (de acuerdo con la ENA 2017 el territorio nacional cuenta con 32406237 hectáreas agrícolas de las cuales 6810762 (21.01%) son

de riego y 25595475 (78.9%) son de temporal). Además los fertilizantes son un insumo estratégico que sirve de arrastre al uso de otros materiales haciendo más intensas las diversas actividades agrícolas, lo cual dinamiza el mercado de los otros insumos y el mercado de la agricultura. En consecuencia, el uso de los fertilizantes tiene un efecto multiplicador en la economía, mayor al de otros insumos (Avila, 2001).

Antecedentes en la industria mexicana de fertilizantes

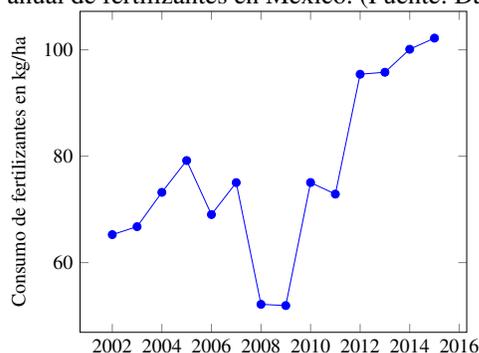
Cuadro B.2: Cronología de la industria mexicana de fertilizantes.

| <i>Año(s)</i> | <i>Acontecimiento(s)</i> |
|---------------|---|
| Años 40 | Se abordó en México el plan para el desarrollo de la producción estatal de fertilizantes nitrogenados a gran escala, a través de la empresa FERTIMEX, que se estableció con la orientación de aprovechar el gas natural, lo que implicó la construcción de grandes plantas de productos de alta concentración de nitrógeno, principalmente la urea. |
| 1982 | FERTIMEX contaba con 64 plantas productoras de fertilizantes. |
| 1991 | En la plenitud de la política privatizadora de las empresas estatales, FERTIMEX anunció su retiro de la distribución secundaria y su sistema de comercialización se orientó al de ventas a consignación, lo que generó la red de distribuidores privados como paso previo a la privatización de esa industria. |
| 1991 | Se inició la privatización de las unidades de FERTIMEX con la unidad Torreón. |
| 1992 | Se concluyó la privatización de las unidades de FERTIMEX con la venta de la unidad Lázaro Cárdenas. |
| 1993 | La industria de fertilizantes, ya en manos de la iniciativa privada, estaba formada por 12 plantas distribuidas en las regiones centro, golfo y noreste del territorio nacional, que tenían una capacidad instalada de 4.5 millones de toneladas, sobresaliendo la producción de urea y sulfato de amonio con el 67% de la producción. Las plantas productoras de urea firmaron los primeros contratos de compra de amoníaco con Pemex. |
| 1994 | El Gobierno de México alineó los precios del gas natural de acuerdo con el índice del Corredor de Houston de los Estados Unidos, precisamente cuando ése era el precio más alto del mundo. |
| 1995 | Los precios del gas natural en México fueron 88% más altos que los precios del gas natural en el Mar Negro, en cuyo litoral se encontraban los mayores productores de fertilizantes del mundo y, en consecuencia, los precios del amoniaco de producción nacional, resultaron inviables para la producción de fertilizantes. |
| 1997 | Las plantas mexicanas de urea y nitrato de amonio suspendieron operaciones. El Estado restringe el gas natural. |
| 1999 | México importa el 50% de Urea y 50% del fosfato diamónico que consume. |
| 2000 – 2004 | La asimetría de los precios del gas natural se hizo aún más desfavorable para México ya que los precios nacionales fueron en promedio 533% más elevados que los precios del Mar Negro por lo que se abandonó en el país todo intento de reiniciar la producción de urea y nitrato de amonio y las plantas productoras de amoniaco del organismo subsidiario de Petróleos Mexicanos, redujeron la producción hasta el 16% de su capacidad instalada. |
| 2001 | México importa el 100% de Urea y 50% del fosfato diamónico que consume. |

| | |
|------|--|
| 2003 | Se establece la iniciativa de Ley de Gas Natural de Proceso, Amoníaco y Fertilizantes Nitrogenados, que proponía dar un precio de estímulo al gas de proceso, menor al del gas combustible, ya que en el caso particular de la fabricación de amoníaco, el gas se usa como insumo y no como combustible. |
| 2007 | Se desató un alza sin precedentes del precio de los fertilizantes a nivel mundial que causó también especulación y alza en los precios de sus fletes marítimos. El alto precio de los fertilizantes de importación en México reclamó la necesidad de reiniciar las operaciones para la producción nacional de urea, aún soportando los altos precios internos del amoniaco y del anhídrido carbónico. |
| 2010 | Los precios del gas natural mexicano fueron 18 – 60 % inferiores a los precios del Mar Negro favoreciendo la industria mexicana de fertilizantes. La Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, dio a conocer los Lineamientos de Operación para que la industria de fertilizantes pudiera tener acceso a un esquema de precios fijos de amoniaco. Sin embargo, quedó un vacío administrativo al no existir un mecanismo que permita a los fabricantes de fertilizantes adquirir gas natural y realizar contratos con Petróleos Mexicanos para su transformación en amoniaco. |
| 2011 | Los análisis realizados por la Secretaría de Energía apuntan a que existe una tendencia a la baja de los precios del gas natural, favorable para México, y prevalecerá a largo plazo. |
| 2012 | La fabricación total de fertilizantes a nivel nacional fue de 1.5 millones de toneladas; debiendo importarse 2.7 millones de toneladas para abastecer al consumo nacional. Aumentó la proporción de fertilizantes fosfatados con respecto a la producción total, cuya cifra alcanzó 65 %, en contraste, disminuyó la producción de los nitrogenados (aproximadamente a 31 %) y los potásicos (con una producción cercana a 4 %). |
| 2014 | PEMEX anuncia la compra de la planta Agro-Nitrogenados S.A de C.V (una empresa productora de urea que tenía cerca de 15 años parada) por una cantidad cercana a los 475 millones de dólares. Mediante Acuerdo CA-128/2014, el Consejo de Administración de Petróleos Mexicanos aprobó la primera reorganización corporativa de dicha empresa, comprendiendo lo relativo a la creación de sus empresas productivas subsidiarias; una de las 5 empresas productivas subsidiarias creadas fue PEMEX-Fertilizantes. La producción de fertilizantes a nivel nacional disminuye un 4 %. |
| 2016 | PEMEX-Fertilizantes compra la empresa productora de fertilizantes Fertinal por 255 millones de dólares. |

Actualmente México continúa importando la mayor parte de los distintos fertilizantes necesarios para el desarrollo de sus actividades agrícolas; fertilizantes nitrogenados como el sulfato de amonio, el nitrato de amonio y la urea; fertilizantes fosfatados como los superfosfatos; y fertilizantes complejos como los mixtos, nitrogenados fosfatados y sulfato de amonio. Relacionado al consumo de fertilizantes a nivel global existen datos provenientes del Banco Mundial que nos permite dar un seguimiento de manera secuencial a las cifras de varios países; según datos del Banco mundial el consumo de fertilizantes en México aumento de 65.26 kg/ha de tierras cultivables en 2002 a 102.205 kg/ha de tierras cultivables en 2015, pasando por un decaimiento profundo de consumo en los años 2008 y 2009 (Cuadro B.3); esto debido al alza de los precios internacionales de los fertilizantes y la elevada dependencia del mercado extranjero, Cuadro B.2.

Cuadro B.3: Consumo anual de fertilizantes en México. (Fuente: Datos del Banco Mundial)



De acuerdo con el ENA 2014, el 77% de la producción agrícola proviene de superficie con uso de fertilizante químico. Para el año 2016 el SIAP informa que México tubo una superficie sembrada de 21938184 hectáreas de las cuales 15148870 hectáreas (69.05%) se le aplico algún tipo de fertilizante químico, el resto 6789314 hectareas se presenta como no fertilizadas. Datos recogidos del SIAP (2016) colocan a los estados de Baja California Sur, Chihuahua, Michoacán, Morelos, Sinaloa, Sonora y Tlaxcala como entidades federativas con mayor superficie (> 90%) de suelo agrícola fertilizado, Cuadro B.4.

Cuadro B.4: Uso de fertilizantes químicos en la superficie sembrada por entidad federativa 2016 (Fuente SIAP).

| Estado | Superficie sembrada (ha) | |
|---------------------|--------------------------|---------------|
| | Total | % Fertilizada |
| Aguascalientes | 143654 | 67.68 |
| Baja California | 213770 | 87.29 |
| Baja California Sur | 42124 | 93.09 |
| Campeche | 335041 | 78.67 |
| Coahuila | 262696 | 78.67 |
| Colima | 160217 | 70.97 |
| Chiapas | 1422216 | 56.95 |
| Chihuahua | 1051800 | 97.13 |
| Ciudad de México | 17224 | 94.62 |
| Durango | 707327 | 59.81 |
| Guanajuato | 922617 | 85.20 |
| Guerrero | 898142 | 67.71 |
| Hidalgo | 560160 | 44.98 |
| Jalisco | 1640070 | 77.07 |
| Edo. de México | 844775 | 89.06 |
| Michoacán | 1127026 | 92.89 |
| Morelos | 132252 | 97.65 |
| Nayarit | 389066 | 63.61 |
| Nuevo León | 347983 | 36.82 |
| Oaxaca | 1367440 | 45.22 |
| Puebla | 977587 | 74.41 |
| Querétaro | 160510 | 75.16 |
| Quintana Roo | 132913 | 44.97 |
| San Luis Potosí | 775113 | 43.36 |
| Sinaloa | 1268062 | 99.68 |
| Sonora | 662596 | 98.61 |
| Tabasco | 252530 | 67.23 |
| Tamaulipas | 1389339 | 63.39 |
| Tlaxcala | 231845 | 92.70 |
| Veracruz | 1517762 | 66.66 |
| Yucatán | 752770 | 11.70 |
| Zacatecas | 1231557 | 56.99 |