



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ZARAGOZA**

**EFFECTO DE LA DOSIFICACIÓN DE ORINA Y  
HECES HUMANAS COMO FUENTE DE  
NUTRIENTES EN EL CULTIVO DE JITOMATE**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO QUÍMICO**

P R E S E N T A:

**AZUCENA SILVA NORMAN**

TUTOR:

M. en I. JOSÉ LUIS MARTÍNEZ PALACIOS



**FES  
ZARAGOZA**

**2012**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



## **JURADO ASIGNADO**

**PRESIDENTE:** Dr. Roberto Mendoza Serna

**VOCAL:** M. en I. José Luis Martínez Palacios

**SECRETARIO:** Quim. Martha Ortiz Rojas

**1er. SUPLENTE:** M. en I. Juana María de la Paz López

**2do. SUPLENTE:** I.Q Maritza Fernández Cruz

## **LUGAR DONDE SE REALIZÓ TESIS:**

Laboratorio de Ingeniería Ambiental, edificio 5, Instituto de Ingeniería, UNAM.

## **TUTOR DE TESIS:**

M. en I. José Luis Martínez Palacios

---

**FIRMA**



## AGRADECIMIENTOS:

*A la persona más importante en mi vida mi mamá Susana Norman Quintero, por ser siempre mi pilar y guía, gracias por tu infinito amor. A mis hermanos Julieta, Alondra y Jorge Luis, por todo su cariño y apoyo. A mi papá Bernardo Silva Aguilar, por darme la vida y enseñarme la mejor lección: “la vida es solo un instante”, este triunfo es suyo.*

*A Mariano Arribas por tu amor, comprensión y paciencia, a Mirra y Abraham por su amistad incondicional y a mi abuela María Quintero por toda su bondad.*

*A la UNAM, la Máxima Casa de Estudios, y al Instituto de Ingeniería que con el apoyo de una beca me permitieron desarrollar este trabajo de tesis y adquirir mucha experiencia profesional.*

*A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) con el Programa de Apoyo de Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) por el apoyo con el proyecto IN-123009 para realizar este trabajo.*

*Al Dr. Enrique César Valdez, Jefe del Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental y a la Biol. Natasha Carime Villaseñor Hernández, Coordinadora del Laboratorio de Ingeniería Ambiental, por facilitar el flamómetro para la lectura de sodio y potasio.*

*Un agradecimiento especial al Ing. José Luis Martínez Palacios, por el espacio que me brindó para formar parte de su equipo, su dedicación, ayuda y enseñanzas. A Sibila Concha Santos, por compartir tus conocimientos y apoyo durante el desarrollo de esta tesis.*



# ÍNDICE

---

<b>RESUMEN.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3 - 5</b>
• Objetivo general.....	4
• Objetivos particulares.....	4
• Hipótesis.....	5
<b>1 ANTECEDENTES.....</b>	<b>6 - 34</b>
1.1 SANEAMIENTO ECOLÓGICO.....	6
1.2 REQUISITOS PARA EL CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS.....	7
• 1.2.1 Condiciones ambientales.....	8
• 1.2.2 Factores edáficos.....	8
• 1.2.3 Macronutrientes.....	9
• 1.2.4 Micronutrientes.....	11
1.3 EXCRETA HUMANA COMO FUENTE DE NUTRIENTES.....	12
• 1.3.1 Orina.....	12
1.3.1.1 Cantidad de orina generada.....	12
1.3.1.2 Nutrientes en la orina.....	12
1.3.1.3 Composición de los nutrientes en la orina y su disponibilidad para las plantas.....	13
• 1.3.2 Heces.....	14
1.3.2.1 Cantidad de heces generadas.....	14
1.3.2.2 Nutrientes en las heces.....	15
1.3.2.3 Composición de los nutrientes en las heces y su disponibilidad para las plantas.....	16
• 1.3.3 Otros constituyentes en la excreta.....	17
1.4 PATÓGENOS EN LA EXCRETA.....	17
• 1.4.1 Patógenos en la orina.....	17
• 1.4.2 Patógenos en las heces.....	18
1.5 TRATAMIENTO HIGIÉNICO DE LA EXCRETA.....	19
1.6 FERTILIZACIÓN DE CULTIVOS.....	22
• 1.6.1 Fertilización con orina.....	24
1.6.1.1 Dosis de aplicación.....	24
1.6.1.2 Estrategias y tiempo de aplicación.....	24
1.6.1.3 Técnicas de aplicación.....	25



1.6.1.4 Experimentación en la dosificación de orina como fertilizante en diferentes cultivos.....	26
• 1.6.2 Fertilización con heces.....	28
1.6.2.1 Dosis de aplicación.....	30
1.6.2.2 Estrategias y tiempo de aplicación.....	30
1.6.2.3 Experimentación en la dosificación de heces como fertilizante en Diferentes cultivos.....	31
<b>2. METODOLOGÍA.....</b>	<b>35 - 53</b>
2.1 MATERIALES Y EQUIPO.....	35
• 2.1.1 Materiales.....	35
• 2.1.2 Equipos.....	36
2.2 CARACTERIZACIÓN.....	37
• 2.2.1 Suelo.....	37
• 2.2.2 Orina.....	37
• 2.2.3 Heces.....	38
2.3 CONDICIONES EXPERIMENTALES.....	39
• 2.3.1 Suelo y nutrientes.....	39
2.3.1.1 Suelo.....	39
2.3.1.2 Orina.....	40
2.3.1.3 Heces.....	40
• 2.3.2 Pruebas.....	40
2.3.2.1 Tratamientos.....	40
2.3.2.2 Manejo específico de pruebas.....	42
2.3.2.3 Cultivo de jitomate.....	43
• 2.3.2 Diseño de experimentos.....	45
• 2.3.4 Condiciones ambientales.....	46
2.3.4.1 Invernadero.....	46
2.3.4.2 Monitoreo de parámetros ambientales.....	47
• 2.3.5 Crecimiento y riego de plantas.....	48
2.3.5.1 Altura de la planta.....	48
2.3.5.2 Cantidad de hojas.....	48
2.3.5.3 Días de cultivo.....	49
2.3.5.4 Peso seco de tallos y hojas.....	49
2.3.5.5 Peso y medidas del jitomate.....	49
2.3.5.6 Peso de raíz.....	49
• 2.3.6 Seguimiento del cultivo.....	50
2.3.6.1 Soporte y guiado de las plantas.....	50



2.3.6.2 Polinización.....	50
2.3.6.3 Control de plaga.....	51
2.3.6.4 Cosecha.....	51
2.3.6.5 Poscosecha.....	52
• 2.3.7 Prueba de lixiviación.....	53
<b>3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>54 -77</b>
3.1 CARACTERIZACIÓN.....	54
• 3.1.1 Suelo.....	54
• 3.1.2 Orina.....	55
• 3.1.3 Heces.....	56
3.2 CULTIVO DE JITOMATE.....	57
• 3.2.1 Condiciones ambientales durante el cultivo.....	57
• 3.2.2 Riego.....	57
• 3.2.3 Altura de plantas.....	57
• 3.2.4 Cantidad de hojas.....	59
• 3.2.5 Peso seco de tallo, hojas y raíz .....	59
• 3.2.6 Producción de jitomate.....	60
3.3 ANÁLISIS DE SUELO POR TRATAMIENTO DESPUÉS DEL CULTIVO.....	62
• 3.3.1 Aniones .....	62
3.3.1.1 Nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ).....	63
3.3.1.2 Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ).....	63
3.3.1.3 Fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ).....	63
• 3.3.2 pH.....	63
• 3.3.3 Conductividad eléctrica.....	64
• 3.3.4 Materia orgánica.....	65
• 3.3.5 Capacidad de intercambio catiónico.....	65
• 3.3.6 Bases intercambiables ( $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Na}^+$ y $\text{K}^+$ ).....	66
• 3.3.7 Cationes lixiviables ( $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Na}^+$ y $\text{K}^+$ ).....	68
3.3ANÁLISIS DE PLANTA Y RAÍZ.....	68
• 3.4.1 Contenido de cationes ( $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Na}^+$ y $\text{K}^+$ ) en planta.....	68
• 3.4.2 Contenido de cationes ( $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Na}^+$ y $\text{K}^+$ ) en raíz.....	70



3.4 ANÁLISIS DEL JITOMATE.....	70
• 3.5.1 Nitrógeno.....	70
• 3.5.2 Contenido de cationes ( $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Na}^+$ y $\text{K}^+$ ) en jitomate.....	71
3.6 ANÁLISIS DE VARIANZA.....	72
3.7 BALANCE DE MASA.....	74
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>78 - 80</b>
4.1 CONCLUSIONES.....	78
4.2 RECOMENDACIONES.....	79
<b>5. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>81 - 84</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>A1 – A10</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>B1 – B9</b>
<b>ANEXO C.....</b>	<b>C1 – C6</b>
<b>ANEXO D.....</b>	<b>D1 – D3</b>



# RESUMEN

---

El saneamiento ecológico es un enfoque de sistema cerrado que, a diferencia de los sistemas tradicionales de baños, utiliza la excreta humana como un valioso recurso que hay que reciclar; por lo tanto, es importante realizar investigaciones para determinar su poder fertilizante en plantas, ya que, hasta el momento, el uso de la orina y de las heces es limitado en todo el mundo.

La excreta requiere especial atención ya que una persona al año genera 51 Kg de heces base húmeda, 550 litros de orina y con ellos se descargan 15 000 litros de agua para su disposición; utilizando este recurso en la agricultura, además de reintegrar los nutrientes al suelo, se reduce la contaminación de cuerpos de agua (superficial y subterránea) y, por lo tanto, el impacto ambiental.

En este trabajo se evaluó la efectividad de la orina y heces humanas como fuente de nutrientes en el cultivo de jitomate, sembrado en suelo ácido, como respuesta a la problemática de disposición y reúso de las excretas. La investigación se desarrolló en un invernadero experimental acondicionado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Los tratamientos se establecieron, con las respectivas dosis de nitrógeno, en base a la caracterización de los residuos y la bibliografía consultada, fueron dispuestos en un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones cada uno, que consistió en un control (T1), regado sólo con agua destilada, una dosis de orina 1 equivalente a 135 kilogramos de Nitrógeno por hectárea (Kg N / ha) T2; una dosis de heces 1 + dosis de orina 1, correspondiendo a 235 Kg N / ha (T3); y, por último, una dosis 2 de heces + dosis 1 de orina, equivalente a 335 Kg N / ha (T4).

Con los resultados se demuestra que, para las variables de cultivo seleccionadas, las plantas dosificadas con heces (T3 y T4) tuvieron 4 veces más altura y 17 veces más biomasa que las plantas regadas solo con agua y orina (T1 y T2); además, solo las plantas de los tratamientos T3 y T4 obtuvieron producción de jitomate, por tratamiento, el resultado fué de 3072 y 3369 Kg, respectivamente. Se comparó la producción obtenida con estudios previos realizados por Surendra et al., 2009 en sus experimentos utilizando orina como fertilizante en el cultivo de jitomate, dando como resultado un rendimiento dos veces mayor a lo reportado por dicho autor. Este mejor rendimiento se atribuyó al hecho de que el suelo ácido inicial contenía un bajo contenido de materia orgánica (MO) 0.984 %; y las heces mejoran de manera importante este parámetro; 3.5 y 5 % de MO para los tratamientos T3 y T4, respectivamente, incrementando el desarrollo y producción de dichos tratamientos.



La MO contribuye de varias maneras: mejora la estructura del suelo, la retención de cationes, la aireación y el drenado del agua en el suelo (Russell et al., 1988), esto se verificó en los tratamientos donde se dosificó heces ya que tuvieron 5 veces más crecimiento radicular que los tratamientos regados solo con agua y orina, y los resultados promedio de bases intercambiadas para T3 y T4 fueron 142, 100.5, 8 y 6.4 Cmol (+) / Kg de los cationes  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$  respectivamente y para T1 y T2 corresponden a 107, 95.5, 5.8 y 2.6 el intercambio de los cationes  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$  respectivamente, observándose un incremento en el intercambio para los tratamientos con heces.

Con el análisis de varianza unifactorial para las diferentes variables analizadas: producción de jitomate, altura de la planta, peso seco de la biomasa y raíz y la Capacidad de Intercambio Cationico (CIC), a un nivel de confianza del 99%, se demuestra que existen diferencias entre las medias de los tratamientos, lo que indica que la dosificación de heces humanas afecta significativamente estas variables; únicamente para el caso de la CIC la media de los tratamientos no difirió para el mismo nivel de confianza, en otras palabras, la dosificación de orina y heces humanas no afectó significativamente el valor de CIC respecto al suelo original.

Es importante mencionar que las heces fueron secadas a 60° C porque, según Niwagaba, 2009a y 2009b, los agentes patógenos pueden ser inactivados a esta temperatura, pero antes de hacer una recomendación en la aplicación de orina y heces como fertilizante en cultivos es importante hacer un estudio microbiológico y cumplir con las restricciones y estipulaciones de las normatividades correspondientes.



# INTRODUCCIÓN

---

Ante el crecimiento acelerado de la población, la situación de inseguridad alimentaria, el decremento de fertilidad del suelo y el encarecimiento de fertilizantes industrializados, existe la necesidad de desarrollar investigaciones basadas en el ahorro y aprovechamiento sustentable de los recursos y fomentar la cultura del reciclaje, con objeto de mejorar condiciones de vida, disminuir el impacto ambiental y el derroche de recursos económicos por inapropiadas políticas de disposición de los residuos.

Debido a la escasez y al incremento del consumo de agua potable, al alto costo de producción, a las pérdidas por fugas y al correspondiente aumento de aguas residuales, existe la necesidad de aplicar métodos que en conjunto ayuden a plantear alternativas prácticas para satisfacer una de las necesidades básicas de alimentación, como puede ser el uso de la orina y heces humanas en la agricultura.

El sector agrícola es el mayor consumidor de agua en la mayoría de los países, utiliza más del 80 % de toda el agua extraída. Actualmente, en el afán de incrementar la producción de alimentos, se ha puesto poca atención en la eficiencia con que operan los sistemas, pero en cambio día a día se abren nuevas áreas a la agricultura con los consecuentes impactos ambientales. También se pierde mucha agua en la conducción a las parcelas, se estima que en promedio, la eficiencia de los sistemas de riego es del 37 %, a nivel mundial. Mucho del volumen perdido se vuelve improductivo o se ve severamente degradado en su calidad al arrastrar sales, pesticidas y elementos tóxicos del suelo (Arreguín *et al.*, 1993).

El saneamiento ecológico se presenta como una alternativa ante esta problemática, basada en un enfoque ecológico que considera a las excretas (orina y heces) como un recurso valioso que debe ser reciclado, reduciendo así el consumo de agua y energía y aprovechando las características nutritivas propias del mismo (Winblad *et al.*, 2004). De esa forma es posible hacer un uso sustentable de los recursos, lo cual permite, dentro de otros factores importantes, el ahorro de agua y reducir la dependencia por el uso convencional de fertilizantes, minerales identificados como no renovables.

Una persona puede generar, en un año, de 400 a 500 litros de orina y unos 50 Kg de heces en base húmeda, además de descargar con éstos del orden de 15,000 litros de agua potable que se contaminan y se usan tan solo como medio de arrastre (Winblad *et al.*, 2004). Al separar la orina y las heces humanas desde su excreción en un sistema de recolección separada del resto de los efluentes domésticos y previendo su uso final, se protege a los cuerpos receptores de agua (ríos, lagos y mares) de una saturación de nutrientes; por lo tanto, se previene también el desequilibrio en los ecosistemas acuáticos.



De los nutrientes en la excreta, se estima que la orina contiene aproximadamente del 80 al 90 % del nitrógeno (N), 50 al 65 % de fósforo (P) y del 50 al 80 % del potasio (K) y la materia fecal del 10 al 20 % de N, 20 al 50 % de P y 10 al 20 % de K (Jönsson *et al.*, 2005; Vinnerås *et al.*, 2001), además las heces proporcionan la mayor parte del carbono excretado, porque contienen casi cuatro veces más carbono que la orina. Por lo tanto, si solo se utilizara la orina, se perdería la posibilidad de reintegrar al suelo todos los nutrientes que excretan las personas (Esrey *et al.*, 2001).

Bajo este contexto, en la presente tesis se planteó investigar a escala experimental el efecto que tiene la dosificación de heces y orina humana como fuente alternativa de nutrientes en el cultivo de jitomate, sembrado sobre suelo ácido. Estableciendo los tratamientos en base a la dosis de nitrógeno sugeridas por la bibliografía consultada y a la caracterización de los residuos, y comparar el efecto de éstos respecto a indicadores de crecimiento como altura, cantidad de biomasa y producción de jitomate; así como la evaluación en el suelo de la capacidad de intercambio catiónico (CIC), bases intercambiables (BI), pH, conductividad eléctrica (CE), antes y después del cultivo, y el comportamiento de iones como nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) en el lixiviado del suelo por la aplicación de orina y heces humanas. Adicionalmente, se evaluó el contenido de cationes (Ca, Mg, Na y K) en el fruto, planta y raíz.

## **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el efecto de dosificar orina y heces humanas como fuente alternativa de nutrientes en el cultivo de jitomate en suelo ácido, comparando la producción con respecto al riego sin fertilizar.

## **OBJETIVOS PARTICULARES**

- Establecer con base en la revisión bibliográfica y las características del suelo ácido, las condiciones experimentales de dosificación de orina y heces en el cultivo de jitomate.
- Comparar la respuesta de cada tratamiento con respecto a variables del cultivo como altura, cantidad de biomasa y producción de jitomate.
- Definir el diseño de experimentos para analizar estadísticamente los resultados de las diferentes variables de seguimiento en el cultivo de jitomate.
- Evaluar la capacidad de intercambio catiónico, bases intercambiables, pH, conductividad eléctrica; así como el comportamiento de iones como  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$  en el lixiviado del suelo antes y después del cultivo de jitomate para determinar la influencia de la dosificación de excretas humanas sobre estos parámetros.



## HIPÓTESIS

Debido al contenido de nitrógeno en la orina y de materia orgánica en las heces, al ser dosificados en el suelo, mejorarán el crecimiento y la producción de cultivos como el jitomate.



# 1

## ANTECEDENTES

---

En este capítulo se hace una recapitulación, con base en la información bibliográfica consultada, de la separación de las excretas humanas (heces y orina) su manejo y disposición, la caracterización y el aprovechamiento sustentable en el cultivo de hortalizas y demás fuentes de alimentación del ser humano.

### 1.1 SANEAMIENTO ECOLÓGICO

Las prácticas de saneamiento que actualmente se promueven son de dos tipos: “flujo y descarga” baños convencionales y “caída y depósito” letrinas. En los últimos cien años se ha considerado al de flujo y descarga como la tecnología ideal, especialmente para las áreas urbanas. Muchos municipios en los países en desarrollo han tratado de adquirir este modelo. Para aquellos que no pueden acceder al sistema de flujo y descarga, la alternativa usual es el sistema de caída y depósito que, generalmente, consiste de una letrina convencional donde se deposita la excreta humana por tiempo indeterminado (Esreyet *al.*, 1999).

La tecnología de flujo y descarga se puede operar aceptablemente y alcanzar un nivel razonable de destrucción de agentes patógenos, sin embargo, en muchos países las aguas negras se descargan a gran escala directamente al ambiente, sin tratamiento alguno. La descarga de aguas negras proveniente de sistemas de drenaje convencional es el mayor causante de contaminación del agua en todo el planeta. Dentro de los principales contaminantes del agua residual se encuentra materia orgánica, cuya descomposición produce la desoxigenación del agua, agentes infecciosos y nutrientes vegetales que estimulan el crecimiento de plantas acuáticas, lo que contribuye a una mayor saturación de nutrientes en el agua (eutrofización), entre muchas otras consecuencias (Esreyet *al.*, 1999).

El tratamiento efectivo de aguas negras es caro y muchas veces no se realiza, especialmente en las áreas urbanas en crecimiento de los países en desarrollo. En consecuencia, los habitantes de bajos ingresos usan alguna variante del sistema de caída y depósito que responda a sus necesidades. Si bien las tecnologías de caída y depósito pueden evitar la contaminación en ciertos casos, se ha comprobado que los nutrientes y los patógenos que se filtran de los inodoros, letrinas y fosas sépticas, causan la contaminación de los mantos freáticos y aguas superficiales cercanas, en todo el mundo.

Los Líderes y las comunidades tienen en la actualidad que enfrentar dos alternativas para disponer los residuos: expandir los sistemas de saneamiento



existentes, con todas sus limitaciones y debilidades, o buscar soluciones enteramente nuevas (Esrey *et al.*, 1999).

El saneamiento ecológico proporciona una opción al saneamiento convencional, además es un intento por resolver algunos de los problemas sociales más apremiantes: enfermedades infecciosas, degradación y contaminación ambiental, así como la necesidad de recuperar y reciclar nutrientes para el cultivo de plantas. Al hacer esto se contribuye a recuperar la fertilidad del suelo, preservar el agua para consumo humano y proteger los ambientes marinos.

Se trata de un enfoque diferente donde, los nutrientes y materia orgánica contenidos en la excreta humana son considerados un recurso importante a reintegrar al ecosistema. Lo que se percibe como desecho humano, tiene que manejarse como un recurso importante que se debe recuperar y reciclar.

En este enfoque alternativo, la excreta se procesa en el mismo lugar donde se produce y, si lo requiere, en otros lugares hasta dejarla libre de patógenos, haciéndola inofensiva. Esto hace que la excreta sea sanitariamente segura y de fácil manejo, en comparación con los sistemas de tratamiento de aguas residuales, que por lo general no logran retener los nutrientes. Las heces son saneadas, y la materia orgánica se aplica a los suelos para mejorar su estructura, fertilidad y capacidad de retención de humedad. Los nutrientes valiosos que se encuentran en la excreta, sobre todo en la orina, se devuelven a la tierra para el cultivo de plantas (Esrey *et al.*, 2001).

Se trata de una manera distinta de pensar: un enfoque que busca cerrar el ciclo, en el que los nutrientes contenidos en la excreta son reintegrados al suelo, en lugar de ser desechados; buscando tener cero descargas de partículas a los cuerpos de agua, manteniéndolos libres de patógenos y nutrientes (Esrey *et al.*, 2001).

Una forma de disminuir la contaminación ambiental, y con ello reducir los impactos negativos que tiene la excreta en la sociedad, es utilizar de forma segura los nutrientes que contiene en el cultivo de plantas. En las regiones donde existe una falta de financiamiento de fertilizantes para asegurar la producción de alimentos, la colecta de orina y heces pueden contribuir significativamente a la seguridad alimentaria y la salud (Vinnerås y Jönsson, 2004).

## **1.2 REQUISITOS PARA EL CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS**

Una aplicación directa de la excreta humana es en los cultivos, por lo que es importante entender el proceso de desarrollo y crecimiento de las plantas. Los requisitos para el crecimiento de las plantas incluyen luz, agua, suelo o soporte para el crecimiento de las raíces y nutrientes; así como una serie de factores ambientales como temperatura y humedad que intervienen en su desarrollo.



## 1.2.1 Condiciones ambientales

Las plantas requieren una serie de condiciones que aseguren su supervivencia. Estos requerimientos hacen referencia no solo a las necesidades nutricionales, sino también a las condiciones ambientales del medio en el que se desarrollan (Seóanez, 1998).

En general, los principales factores que influyen en el desarrollo son la temperatura y el fotoperiodo, mientras que los que determinan la velocidad de crecimiento son la luz, el CO<sub>2</sub>, los nutrientes y el agua (Russell *et al.*, 1988).

La cantidad de radiación solar es fundamental para todos los procesos de desarrollo vegetal, ya que permite la realización de la fotosíntesis. La temperatura condiciona el funcionamiento del metabolismo celular y de los mecanismos de asimilación y de transpiración. El agua constituye aproximadamente el 95% del peso de los vegetales, y es indispensable para todas sus funciones fisiológicas. Los requisitos hídricos varían con las especies y el periodo de crecimiento (Russell *et al.*, 1988).

## 1.2.2 Factores Edáficos

El término edafología, proviene del griego *edafos* “suelo” y *logía* “ciencia” o “estudio”, es una rama de la ciencia del suelo que estudia la composición y naturaleza del suelo en su relación con las plantas y el entorno que le rodea (Porta *et al.*, 2008).

El **suelo** tiene tanta importancia como el clima para el crecimiento y desarrollo de las plantas, pero es mucho más sencillo modificarlo, especialmente con las técnicas actuales. La relación entre las plantas y el suelo es extremadamente compleja. La aparición de un determinado tipo de vegetación está vinculada a diversos factores edáficos: contenido y disponibilidad de nutrientes, textura y estructura, pH, profundidad, cantidad de materia orgánica, etc. (Russell *et al.*, 1998).

El **pH** determina las condiciones de reacción, solubilidad y accesibilidad de las sustancias nutritivas. El conocimiento de la estructura del suelo, permite interpretar su estabilidad y los movimientos verticales del agua.

La **textura** se indica por la proporción de limo, arcilla y arena, que influyen sobre la permeabilidad (movimiento de aire y agua), la intensidad de infiltración y la capacidad de retención de la humedad, así como la disponibilidad de las sustancias nutritivas, y, por lo tanto, sobre el desarrollo de las raíces.

Se denomina **estructura** al arreglo y distribución de las partículas sólidas de un suelo y sus agregados. Una estructura bien desarrollada indica generalmente la presencia de arcilla y materia orgánica, las cuales tienen propiedades aglutinantes. La presencia de una estructura, su forma, tamaño y disponibilidad o



arreglo de los agregados, determina la cantidad y tamaño de los poros y por consiguiente el grado de permeabilidad.

El contenido de **materia orgánica** de los suelos resulta de la acumulación de residuos de plantas y animales, su estado de descomposición depende de la vegetación originaria. Otro factor importante son los microorganismos; estos cooperan en la descomposición de la materia orgánica y liberan los nutrientes vegetales con formas inorgánicas simples, que serán utilizados por las plantas o cultivos (Seóanez, 1998).

Además de los factores del suelo mencionados, que influyen en el desarrollo de las plantas, éstas requieren de oxígeno, aire, nutrientes, luz solar y agua, para realizar sus funciones fotosintéticas. El 96 % de los requerimientos para el crecimiento de una planta saludable lo proporciona el oxígeno (45 %), carbono (45 %) e hidrógeno (6 %). Los nutrientes requeridos se dividen en macro y micronutrientes los cuales se necesitan en pequeñas cantidades, como el nitrógeno (1.5 %), fósforo (0.15 %), potasio (0.15 %) y otros nutrientes (0.2 %), aunque todos son tan importantes como los elementos principales. Cada uno de estos nutrientes desempeña funciones complementarias. Un desequilibrio en los nutrientes puede resaltar en un incremento de plaga y un exceso de nitrógeno hace que las plantas sean más vulnerables a los ataques de enfermedades (Esrey *et al.*, 2001).

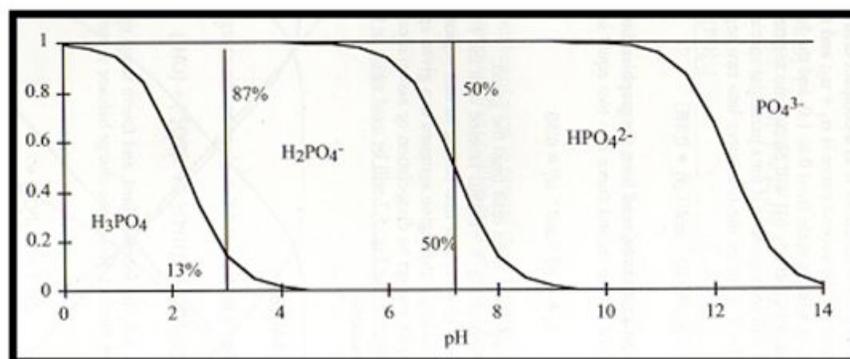
### 1.2.3 Macronutrientes

Los elementos generalmente clasificados como macronutrientes primarios son: nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y como nutrientes secundarios: azufre (S), calcio (Ca) y magnesio (Mg). La absorción de macronutrientes es alrededor de 100 veces la de micronutrientes, estos son principalmente tomados del suelo por las raíces en forma iónica (Jönsson *et al.*, 2004) y se describen a continuación.

El N es frecuentemente el nutriente más limitante para el crecimiento de las plantas, y el consumo de éste es por lo general mayor que el total de los otros macronutrientes y micronutrientes en conjunto. El N es absorbido por la planta como iones nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y amonio ( $\text{NH}_4^+$ ). 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 (Jönsson *et al.*, 2004). Las plantas verdes con follaje y no leguminosas requieren más nitrógeno que otros tipos de plantas, se necesita para el crecimiento del follaje y brotes, y les da un color verde oscuro a las plantas. El nivel de nitrógeno que se agrega al suelo es importante pues afecta el acceso que tiene la planta a otros nutrientes como fósforo y potasio. Además es importante ya que incrementa el contenido de proteínas en algunos alimentos y semillas para forrajes (Esrey *et al.*, 2001).

El P es consumido por las plantas como iones fosfato (a un pH entre 5 y 7 principalmente como  $\text{HPO}_4^{2-}$  y  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ), figura 1.1. La fuente natural de P

disponible para las plantas proviene de la disolución de fosfatos solubles en el suelo y de la mineralización de la materia orgánica (Jönsson *et al.*, 2004). Aquellas plantas que dan flores y frutos necesitan más fósforo; además el P ayuda a que las plantas sean más resistentes a la sequía y más duras. Acelera la maduración, ayuda a la formación de la semilla y la fruta, y estimula el crecimiento de las raíces; asimismo, ayuda al crecimiento y a la formación de nódulos en las leguminosas (Esrey *et al.*, 2001).



**Figura 1.1 Diagrama de distribución de especies del ácido fosfórico en función del pH. Las líneas verticales se dividen en segmentos proporcionales a las fracciones  $\alpha_n$  (Butler, 1998)**

La alta solubilidad del K en el agua a menudo resulta una buena dotación de K disponible para las plantas. Sin embargo, muchos cultivos, como las hortalizas, necesitan grandes cantidades de potasio, y, por lo tanto, la fertilización adicional con K puede mejorar el crecimiento de las plantas. El potasio incrementa la resistencia de las plantas a las enfermedades, crea la fuerza para soportar el invierno y resistencia ante la sequía y produce tallos rígidos que reducen los efectos negativos del exceso de agua. También favorece el crecimiento de verduras, frutos y tubérculos (Esrey *et al.*, 2001).

El S es también altamente soluble en agua y la mayoría de los cultivos lo necesitan de cierta manera en cantidades menores a las del P. La adición anual de S es con frecuencia necesaria; interviene junto con el N y el P en la formación de la clorofila, proteínas, aminoácidos, enzimas y vitaminas (Jönsson *et al.*, 2004). Las plantas lo absorben del suelo en forma de ion sulfato ( $\text{SO}_4^-$ ), puede proceder de la atmósfera y se incorpora al suelo a través de la lluvia. Igualmente procede del humus en forma de azufre orgánico que las bacterias mineralizan para que pueda ser absorbido por la planta.

El Mg forma parte de la clorofila, por lo tanto resulta imprescindible para la fotosíntesis. Interviene en el crecimiento de las plantas a través de la activación hormonal. El Mg de las plantas procede de los minerales del suelo, de la materia orgánica y de los fertilizantes añadidos a los cultivos.



El Ca forma parte de la estructura celular de las plantas. Las plantas lo acumulan en forma de ión ( $\text{Ca}^{2+}$ ), principalmente en las hojas. Aparece en las paredes celulares a las cuales les proporciona permeabilidad e integridad o en las vacuolas en forma de oxalatos. Contribuye al transporte de los minerales así como a su retención. Interviene en la formación de proteínas. Contribuye al crecimiento de las semillas y la maduración de los frutos. Proporciona vigor evitando que las plantas envejezcan antes. Es vital para contrarrestar el efecto de las sales alcalinas y los ácidos orgánicos (Raven *et al.*, 1999).

#### 1.2.4 Micronutrientes

Los micronutrientes son también esenciales para el crecimiento de las plantas, pero son asimilados en pequeñas cantidades, los elementos clasificados como micronutrientes son: boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), níquel (Ni) y zinc (Zn) (Frausto da Silva y Williams, 1997; Marschner, 1997; citados por Jönsson *et al.*, 2004). La mayoría de los micronutrientes son necesarios para formar diferentes enzimas. Estos nutrientes están normalmente disponibles en cantidades suficientes en el suelo y en la mineralización del material orgánico. Solamente en circunstancias especiales la escasez de los micronutrientes limita el crecimiento de las plantas. Cuando la excreta humana es usada como un fertilizante el riesgo de dicha deficiencia es mínimo, ya que la excreta contiene todos los micronutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas (Jönsson *et al.*, 2004). Las principales funciones de cada uno de ellos se describen a continuación.

El Fe, es fundamental para que se pueda formar la clorofila y enzimas por transferencia de electrones. El Fe de las plantas procede del suelo y de la aplicación de fertilizantes (sulfato de hierro y quelatos).

El Cu es muy importante para el crecimiento vegetal, ya que activa ciertas enzimas y forma parte del proceso de formación de la clorofila. Ayuda en el metabolismo de las raíces y consigue que las plantas utilicen mejor las proteínas.

El Ni, es necesario para el funcionamiento de la enzima ureasa, y necesario para la germinación de las semillas.

El Zn participa en la formación de las auxinas, un grupo de hormonas vegetales que controla el crecimiento vegetal. Resulta también esencial en la transformación de los hidratos de carbono.

El Cl interviene en el metabolismo de las plantas. El cloro de las plantas procede del suelo.

El Mn participa en el proceso enzimático relacionado con el metabolismo del N y en la descomposición de los carbohidratos. A su vez interviene en la formación de la clorofila; este nutriente también procede del suelo.



El Mo es necesario para que las leguminosas puedan fijar el N atmosférico, procede del suelo.

Y, por último el B, que contribuye en la formación de los carbohidratos y resulta esencial para el desarrollo de las semillas y de los frutos (Raven *et al.*, 1999).

### 1.3 EXCRETA HUMANA COMO FUENTE DE NUTRIENTES

La excreta humana es producto de desecho del metabolismo corporal. La apariencia, características físicas y químicas de la orina y heces dependen de factores tales como la salud de la persona, de la cantidad así como del tipo de alimentos y líquidos consumidos, entre otros (Feachem *et al.*, 1983; Lentner *et al.*, 1981 citados por Niwagaba, 2007).

#### 1.3.1 Orina

La orina es la fracción de la excreta producto de los iones y del agua que desecha el organismo y se concentran en los riñones (Guyton *et al.*, 1996). La orina es el fluido desechado por el organismo como un medio para el equilibrio de los líquidos y las sales del cuerpo, por lo tanto, es variable la cantidad de orina excretada por una persona (Jönsson *et al.*, 2004). Se compone en gran medida de agua, aproximadamente el 93-96 %, (Vinnerås *et al.*, 2006), y contiene grandes cantidades de nutrientes solubles que pueden aprovecharse para el crecimiento de las plantas.

##### 1.3.1.1 Cantidad de orina generada

La cantidad de orina excretada por una persona depende del volumen de bebidas ingeridas y la cantidad de sudor generado, y de otros factores como la dieta, actividad física y el clima. Una sudoración excesiva da como resultado una orina concentrada, mientras que el consumo de grandes cantidades de líquidos diluye la orina. A continuación, tabla 1.1, se resume información de la cantidad de orina generada en gramos por persona por día (g / p·d) reportada por diferentes autores. En términos generales, se considera que en promedio una persona desecha del orden de 1250 g / p·d de orina  $\pm$  187g / p·d.

**Tabla 1.1 Cantidad de orina generada en gramos por persona por día (g/p.d), reportada por diferentes autores (Niwagaba, 2009a; Jönsson *et al.*, 2005)**

VALOR REPORTADO (g / p·d)	REFERENCIA
1000-1300	Feachem <i>et al.</i> , (1983)
1500	Vinnerås <i>et al.</i> , (2006)
1200	Steinfeld (1999)
1100-1400	Winblad <i>et al.</i> , (2004)



### 1.3.1.2 Nutrientes en la orina

Las cantidades eliminadas de nutrientes por el cuerpo humano dependen de la dieta y, por lo tanto, difieren entre las personas, así como entre las sociedades (Austin *et al.*, 2005).

La mayor parte de los nutrientes de la excreta humana se encuentran en la orina, la cual contiene aproximadamente del 80 al 90 % del N, 50 al 65 % de P y del 50 al 80 % del K (Jönsson *et al.*, 2005; Vinnerås *et al.*, 2001). La cantidad de nutrientes excretados en la orina por persona cada año han sido calculados por diferentes autores, los cuales se presentan en la tabla 1.2.

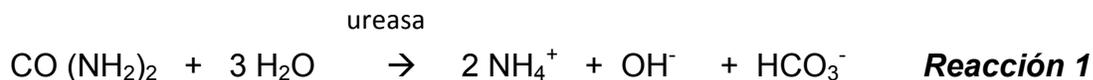
**Tabla 1.2 Cantidad de nutrientes excretados vía orina, en gramos por persona cada día, reportado por diferentes autores (Tabla modificada de Jönsson *et al.*, 2005)**

REFERENCIA	N <sub>tot</sub> (g / p·d)	P <sub>tot</sub> (g / p·d)	K <sub>tot</sub> (g / p·d)
Kärman <i>et al.</i> (1999)	11	1	2.5
Jönsson <i>et al.</i> (2005)	11	0.9	2.4
Vinnerås <i>et al.</i> (2004;2002)	10.96	1.0	2.73
Andersson <i>et al.</i> (2002)	10.5	0.69	2.25
Jönsson <i>et al.</i> (1998)	8.97	0.77	2.47
Vinnerås <i>et al.</i> (1998)	7.7	0.47	1.6
Lindgren (1999)	5.1	0.41	1.23
$\bar{X} \pm \sigma$	<b>9.3 ± 2.2</b>	<b>0.74 ± 0.23</b>	<b>2.1 ± 0.54</b>

$\bar{X}$  Media aritmética,  $\sigma$  desviación estándar.

### 1.3.1.3 Composición de los nutrientes en la orina y disponibilidad para las plantas

El N urinario consiste de urea; al momento de la excreción el pH de la orina está generalmente alrededor de 6, pero puede variar entre 4.5 y 8.2 (Lentner *et al.*, 1981 citado por Niwagaba, 2007, y Jönsson *et al.*, 2004). En la presencia de la enzima ureasa, la urea es rápidamente hidrolizada en amonio y dióxido de carbono (Reacción 1), y los iones de hidróxido producidos normalmente incrementan el pH a 9–9.3 de acuerdo con la Reacción 1. Generalmente la ureasa permanece en los conductos del sistema urinario y, por tanto, la transformación antes mencionada es muy rápida, generalmente en pocas horas (Jönsson *et al.*, 2004).



El amonio está disponible directamente para las plantas y es un fertilizante excelente, lo que se verifica por el hecho de que la urea (la cual es hidrolizada a amonio por la ureasa en el suelo) y el amonio son dos de los fertilizantes de N más usados en el mundo. El amonio, cuando se aplica al suelo de cultivo, se oxida (por la actividad microbiana) en nitrato en unos pocos días como se muestra en



las reacciones 2 a 4; en suelos con una actividad microbiana muy baja, estas transformaciones pueden requerir más tiempo (Jönsson *et al.*, 2004):



La disponibilidad del N de la orina para las plantas es la misma que la de los fertilizantes químicos de urea o amonio. Esto es de esperarse, ya que la mayoría del N de la orina se encuentra en forma de urea y amonio (Niwagaba 2007, Jönsson *et al.*, 2004).

El fósforo en la orina es prácticamente inorgánico (95-100 %) y es excretado en iones fosfato; Jönsson *et al.*, 2005, mencionan que el 90 % del P en la orina es como ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) y el resto es P-particulado, que representan las precipitaciones del fósforo asociado a la materia orgánica como a la inorgánica.

Las variaciones de potasio son de 1.23 a 2.73 g / p·d. El potasio siempre se encuentra disuelto (Jönsson *et al.*, 2005). El K y S excretados en la orina como iones, los cuales están disponibles directamente para las plantas. Esta es la misma forma provista por los fertilizantes químicos y, por consiguiente, su efecto fertilizante debe ser semejante (Kirchmann y Pettersson, 1995, citados por Niwagaba 2007; Jönsson *et al.*, 2004).

### 1.3.2 Heces

Las heces son el conjunto de los desperdicios generalmente sólidos o líquidos producto final del proceso de la digestión que pasa por el intestino, mezclado con material extraído de la corriente de sangre o de las glándulas y los intestinos, la mucosidad y la bilis, que le da el característico color café (Guyton *et al.*, 1996). Las heces contienen principalmente agua, nutrientes y residuos de comida, así como una gran cantidad de virus, bacterias, protozoos y huevos de helmintos (Niwagaba, 2009a, 2007).

#### 1.3.2.1 Cantidad de heces generadas

La cantidad de heces producidas por una persona depende de la composición de los alimentos consumidos. Los alimentos bajos en fibras, como la carne, dan lugar a pequeñas cantidades de heces (tanto en masa como en volumen) a diferencia de los alimentos ricos en fibra. La producción fecal en los países desarrollados es de aproximadamente 80 a 120 g / p·d (peso húmedo) de heces, lo que corresponde a cerca de 16 a 24 g / p·d de la materia seca. La tasa de excreción fecal para América y Europa se estiman en 100 y 200 g / p·d, respectivamente, mientras que en los países en desarrollo se estima un promedio de 350 g / p·d en las zonas rurales y de 250 g / p·d en las zonas urbanas (Guyton, 1992; Feachem *et al.*, 1983, citados por Niwagaba, 2009a, 2007).



En la tabla 1.3 se muestra la cantidad de heces generadas por día por persona, reportada por varios autores y estimadas para diferentes países y regiones del mundo.

Vinnerås *et al.* (2006), basado en sus mediciones, menciona que la excreción fecal de 140 g / p·d contiene una humedad del 78 %. Para la tasa de excreción fecal entre 100 y 150 g / p·d, el contenido de humedad es de alrededor del 75 %, pero éste valor incrementa conforme incrementa el peso, hasta aproximadamente 90 %.

**Tabla 1.3 Cantidad de heces generada por día por persona, estimada para diferentes países (Niwagaba, 2009a; Jönsson *et al.*, 2005)**

PAÍS O CONTINENTE	VALOR (g / p·d)	REFERENCIA
América	100	Feachem <i>et al.</i> , 1983
Europa	200	Feachem <i>et al.</i> , 1983
China	315	Gao <i>et al.</i> (2002)
Kenia	520	Pieper (1987)
Tailandia	120-400	Schouw <i>et al.</i> (2002)
Suiza	140	Vinnerås <i>et al.</i> (2006),

### 1.3.2.2 Nutrientes en las heces

Como la orina, el contenido de nutrientes en las heces es originado por el consumo de alimentos. Se estima que el contenido de los nutrientes en alimentos se distribuye a la fracción fecal en las siguientes proporciones: 10-20 % de N, 20-50 % P y 10-20 % de K. Alrededor del 20 % de nitrógeno fecal es amoníaco, bioquímicamente degradado de las proteínas, péptidos y aminoácidos, el 17 % se encuentra en las bacterias y el resto es nitrógeno orgánico combinado en moléculas como el ácido úrico y enzimas (Vinnerås *et al.*, 2006; Guyton, 1992; Lentner *et al.*, 1981; Berger, 1960, citados por Niwagaba, 2009a). Además, las heces proporcionan la mayor parte del carbono excretado, contienen casi cuatro veces más carbono que la orina. Por lo tanto, si solo se utilizara la orina, se perdería la posibilidad de reintegrar al suelo todos los nutrientes que excretan las personas (Esrey *et al.*, 2001).

En la tabla 1.4 se muestra el contenido de nutrientes en las heces reportado por diferentes autores. Como se muestra en dicha tabla el contenido de nitrógeno varía de 1.5 a 1.76 g / p·d; las mediciones de varios autores para el N concuerdan con el valor de 1.5 g / p·d.

La variación para el P son pequeñas entre 0.6-0.5 g / p· d. Varias referencias señalan que la mayoría del P en las heces está en la forma de pequeños gránulos de fosfato de calcio (Jönsson *et al.*, 2005).



**Tabla 1.4 Cantidad (g) de nutrientes excretados vía heces por persona por día (Jönsson et al., 2005)**

REFERENCIA	N <sub>tot</sub> (g / p·d)	P <sub>tot</sub> (g / p·d)	K <sub>tot</sub> (g / p·d)
Weglin & Vinnerås (2000)	1.76	0.6	1.5
Jönsson <i>et al.</i> (2005)	1.5	0.5	0.9
Kärrman <i>et al.</i> (1999)	1.5	0.5	1.0
Vinnerås <i>et al.</i> (2004, 2002).	1.5	0.5	1.0
$\bar{X} \pm \sigma$	<b>1.56 ± 0.13</b>	<b>0.52 ± 0.05</b>	<b>1.1 ± 0.27</b>

### **1.3.2.3 Composición de los nutrientes en las heces y disponibilidad para las plantas**

La fracción fecal contiene también una cantidad considerable de nutrientes, relativamente descontaminados. En comparación con la orina, que tiene nutrientes solubles en agua, las heces contienen tanto nutrientes solubles en agua como nutrientes que están combinados en partículas grandes insolubles en agua. Sin embargo, alrededor del 50 % del N y la mayoría del K en las heces son solubles en agua (Fraústo da Silva y Williams, 1997; Guyton, 1992; Trémolières *et al.*, 1961; Berger, 1960 citados por Niwagaba, 2009a, 2007).

El P se encuentra principalmente como partículas de fosfato de calcio, lentamente soluble en agua (Fraústo da Silva y Williams, 1997 citados por Niwagaba, 2009a, 2007). La disponibilidad de los nutrientes de la materia fecal para las plantas es más baja y más lenta que la de los nutrientes de la orina. Esto se debe a que la mayor cantidad de P y una gran cantidad de N provienen de materia no digerida y necesita ser degradada en el suelo para estar disponible. No obstante, el material orgánico en las heces se degrada y así su contenido de N orgánico y P se vuelven disponibles. Los fosfatos de calcio también son disueltos y se vuelven disponibles para las plantas y estos se encuentran tan disponibles como los suministrados por los fertilizantes químicos. El K en las heces está en forma iónica, por lo que está disponible directamente para las plantas. Únicamente para el N la disponibilidad de los nutrientes fecales es considerablemente menor que la de los fertilizantes químicos o la orina. Las altas concentraciones de P, K y materia orgánica en la materia fecal pueden ocasionar un incremento sustancial en la producción de cultivos, especialmente en suelos escasos de nutrientes. La materia orgánica contribuye de varias maneras: mejorando la estructura del suelo, aumentando la capacidad de retención del agua y la capacidad de amortiguamiento y favoreciendo a los microorganismos del suelo, sirviéndoles como fuente de energía (Jönsson *et al.*, 2004).

### 1.3.3 Otros constituyentes de las excretas

El contenido de metales pesados y otras sustancias contaminantes son generalmente bajos o muy bajos en la excreta, dependen de las cantidades presentes en los productos consumidos. El contenido de estas sustancias es mayor en las heces en comparación con la orina. La causa principal de esto lo proporcionan los micronutrientes y otros metales pesados que pasan a través del intestino sin ser afectada; aún así, las concentraciones de sustancias contaminantes en las heces son usualmente más bajas que en los fertilizantes químicos y las aguas grises. (Jönsson *et al.*, 2005, 2004). La tabla 1.5 sintetiza los valores de metales pesados en la excreta reportados por diferentes autores.

**Tabla 1.5 Cantidad de metales pesados excretados vía orina y heces, en mg por día por persona, reportados por varios autores (Jönsson *et al.*, 2005)**

REFERENCIA	MUESTRA	Cu	Zn	Cr	Ni	Pb	Cd	Hg
Schouw <i>et al.</i> (2002)	O + H	1.4-1.5	9-16	-	0.3	0.07-0.14	0.2-0.3	0.01
Vinnerås, 2002.	O + H	1.2	11.14	0.03	0.08	0.022	0.011	0.011
	H	1.1	11	0.02	0.07	0.02	0.01	0.01
	O	0.1	0.04	0.01	0.01	0.002	0.001	0.001
Andersson & Jenssen (2002)	H	1.74	46.4	0.135	0.226	0.037	0.016	0.009
	O	0.0471	0.2926	0.00045	0.0114	0.0115	0.00022	0.00044
Jönsson <i>et al.</i> (1998)	O	5.99	0.49	0.048	0.15	<0.025	<0.0019	0.0011
Kärman <i>et al.</i> (1999)	H	1.1	11	0.2	0.074	0.02	0.01	0.063
	O	0.1	0.47	0.044	0.14	0.024	0.0024	0.001

O, orina; H, heces; O+H, orina+heces

### 1.4 PATÓGENOS EN LA EXCRETA

La excreta humana puede contener también microorganismos patógenos, que directamente o al ser diluidos en las aguas residuales constituyen una amenaza para la salud humana. La diarrea y las enfermedades parasitarias son factores importantes que contribuyen con la Carga Mundial de Morbilidad (GBD, por sus siglas en inglés), donde la transmisión ambiental a través del agua y de los cultivos alimenticios contaminados o mediante el contacto directo con las fuentes



contaminadas por materia fecal son los mayores contribuidores (Schönning y Stenström, 2004).

La excreta humana contiene gérmenes, huevecillos y otros organismos. Algunos de ellos causan enfermedad y por ello se les llama patógenos. La gran mayoría de ellos se encuentran en las heces. La orina es comúnmente estéril, en ciertos casos contiene patógenos, pero es en las heces donde se encuentra la mayor fuente de patógenos que causan estas enfermedades.

Los patógenos y los parásitos hallados en la excreta humana pueden causar todo un abanico de enfermedades, como: tifoidea, paratifoidea y otras enfermedades, incluidas la diarrea. No todos los contagios por patógenos y parásitos causan la muerte, pero un debilitamiento constante causado por estas enfermedades predispone a la gente a una enfermedad permanente y posiblemente a la muerte (Esrey *et al.*, 1998).

#### **1.4.1 Patógenos en la orina**

La orina en una persona sana es estéril en la vejiga. Cuando se transporta fuera del cuerpo, los diferentes tipos de bacterias dérmicas son recogidos y la orina recién excretada normalmente tiene menos de  $10^3$  organismos por mililitro. Los patógenos que pueden transmitirse a través de la orina rara vez son lo suficientemente comunes para constituir un problema importante de salud pública; por lo tanto, no se considera un riesgo su reutilización. El riesgo principal de transmisión de enfermedades por el manejo y uso de la orina humana están relacionados con la contaminación fecal y no con la orina misma (Schönning y Stenström, 2004).

En la tabla 1.6 (página siguiente) se describen los patógenos que pueden ser excretados con la orina y su importancia como ruta de transmisión.

#### **1.4.2 Patógenos en las heces**

Las heces no siempre contienen agentes patógenos. Sin embargo, desde una perspectiva de riesgo, siempre debe considerarse su presencia, ya que existen muchos tipos de infecciones entéricas. Para garantizar la reducción de patógenos, las heces deben ser tratadas o almacenadas en condiciones controladas. Existen cuatro grandes grupos de microorganismos que es posible que se excreten, principalmente en las heces: bacterias, protozoos, virus y helmintos (Austin *et al.*, 2005).



**Tabla 1.6 Patógenos de la orina y su importancia como ruta de transmisión (Schönning y Stenström, 2004)**

PATÓGENOS	ORINA COMO RUTA DE TRANSMISIÓN	IMPORTANCIA
<b>Bacterias</b>		
<i>Leptospira interrogans</i>	Usualmente a través de la orina animal	Probablemente bajo
<i>Salmonella typhi</i> y <i>Salmonella paratyphi</i>	Probablemente inusual, excretada en orina en infecciones sistémicas	Bajo comparado con otras rutas de transmisión
<i>Schistosoma haematobium</i> (huevos excretados)	En forma indirecta, la larva infecta a los humanos a través del agua dulce	Necesita ser considerado en áreas endémicas donde el agua dulce se encuentra disponible
Mycobacteria	Inusual, usualmente transportado por el aire	Bajo
<b>Virus</b>		
Citomegalovirus (CMV), JCV, BKV, adeno, hepatitis y otros	Normalmente no reconocido, con excepción de casos aislados de hepatitis A y sugerido para la hepatitis B. Se requiere más información.	Probablemente bajo
<b>Protozoarios</b>		
Microsporidia	Sugerido, pero no reconocido	Bajo
Causantes de las enfermedades venéreas	No sobreviven durante períodos significativos fuera del cuerpo	-
Infecciones del tracto urinario	No hay una transmisión ambiental directa	Bajo

Los patógenos de cuidado por la transmisión ambiental a través de las heces causan principalmente síntomas gastrointestinales como diarrea, vómito y dolores de estómago; algunos podrían causar síntomas que envuelvan otros órganos y secuelas severas. La tabla 1.7 (página siguiente) muestra un listado de los principales agentes patógenos de preocupación, excretados en las heces y sus síntomas (Schönning y Stenström, 2004).

### 1.5 TRATAMIENTO HIGIÉNICO DE LA EXCRETA

El uso directo de la excreta, heces y orina humana, da como resultado el uso benéfico de los nutrientes en la agricultura; éstos productos no contienen usualmente contaminantes químicos industriales que podrían impedir su reuso, pero deben de ser tratados para reducir los niveles de patógenos a un nivel seguro (Schönning y Stenström, 2004).



**Tabla 1.7 Patógenos excretados en las heces y enfermedades relacionadas, incluye ejemplos de los síntomas que pueden causar (Schönning y Stenström, 2004)**

GRUPO	PATÓGENO	ENFERMEDAD-SÍNTOMA
<b>Bacteria</b>	<i>Aeromonas</i> app. <i>Campylobacter jejuni/coli</i>  <i>Escherichia coli</i> (EIEC, EPEC, ETEC, EHEC) <i>Pleisiomonas shigelloides</i>  <i>Pseudomonas aeruginosa</i>  <i>Salmonella typhi/paratyphi</i> <i>Salmonella</i> spp. <i>Shigella</i> spp.  <i>Vibrio cholerae</i>	Enteritis Campilobacteriosis-diarrea, calambres, dolor abdominal, fiebre, náuseas, artritis, síndrome de Guillain-Barré Enteritis Enteritis Varios: bacteriemia, infecciones de la piel, otitis, meningitis, neumonía Fiebre tifoidea y fiebre paratifoidea- dolor de cabeza, fiebre, malestar general, anorexia, bradicardia, esplenomegalia, tos  Salmonelosis- diarrea, fiebre, calambres abdominales  Shigelosis- disentería (diarrea sanguinolenta), vómitos, calambres, fiebre, síndrome de Reiter  Cólera- diarrea acuosa, grave y mortal si no reciben tratamiento
<b>Virus</b>	Adenovirus Adenovirus entérico 40 y 41 Astrovirus Calicivirus (incl. Noroviruses) Cocksackievirus Echovirus Echovirus tipos 68-71 Hepatitis A  Hepatitis E Poliovirus  Rotavirus	Varios; enfermedad respiratoria. Enteritis Enteritis Enteritis Varios; enfermedad respiratoria, enteritis, meningitis viral Meningitis aséptica; encefalitis; a menudo asintomático Meningitis; encefalitis; parálisis Hepatitis- fiebre, malestar general, anorexia, náuseas, molestias abdominales, ictericia Hepatitis Poliomielitis- a menudo asintomática, fiebre, náuseas, vómitos, dolor de cabeza, parálisis Enteritis
<b>Protozoarios</b>	<i>Cryptosporidium parvum</i> <i>Cyclospora cayetanensis</i> <i>Entamoeba histolyca</i>  <i>Giardia intestinalis</i>	Criptosporidiosis- diarrea acuosa, cólicos abdominales y dolor A menudo asintomático; diarrea; dolor abdominal Amebiasis- A menudo asintomática, la disentería, malestar abdominal, fiebre, escalofrío Giardiasis- diarrea, calambres abdominales, malestar, pérdida de peso
<b>Helmintos</b>	<i>Ascaris lumbricoides</i> <i>Taenia solium/saginata</i> <i>Trichuris trichiura</i> Anquilostomas	En general pocos o ningún síntoma; sibilancias, tos, fiebre, enteritis; eosinofilia pulmonar Imperceptible a vaga molestia del tracto digestivo a emanación con piel seca y diarrea Picazón, erupción, tos, anemia, deficiencia de proteínas

Después de la excreción, la concentración de los patógenos entéricos disminuye con el tiempo por la muerte o pérdida de poder infeccioso de la cantidad de los organismos. Los protozoos y los virus no son capaces de desarrollarse en el ambiente fuera del huésped, por lo que su número siempre decrecerá, mientras que las bacterias pueden multiplicarse bajo condiciones ambientales favorables. Los helmintos pueden necesitar un período de latencia después de la excreción antes de ser infecciosos. La habilidad de los microorganismos para sobrevivir en el ambiente está definida por su persistencia a tolerar las condiciones predominantes.



El tiempo y las condiciones predominantes son las condiciones que generalmente afectan la supervivencia de los microorganismos en el medio ambiente. Varios factores físico-químicos y biológicos tienen cierto impacto, pero varía según los microorganismos. Estos factores también pueden utilizarse por separado o en combinación con el tiempo como métodos de tratamiento para producir fertilizantes seguros a partir de la excreta. En la tabla 1.8 se muestra una descripción de estos factores (Niwagaba *et al.*, 2009b; Schönning y Stenström, 2004).

**Tabla 1.8 Factores físico-químicos y biológicos que afectan la supervivencia de los microorganismos en el medio ambiente (Schönning y Stenström, 2004)**

<b>FACTOR FÍSICO-QUÍMICO Y BIOLÓGICO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>Temperatura</b>	La mayoría de microorganismos sobreviven bien a bajas temperaturas (<5 °C) y decrecen rápidamente a altas temperaturas (>40-50 °C); este es el caso en el agua, suelo, aguas residuales y cultivos. Para asegurar la inactivación en procesos de compostaje, se necesitan temperaturas alrededor de los 55-65 °C para matar todos los tipos de patógenos (excepto las esporas de las bacterias) en unas cuantas horas (Haug, 1993).
<b>pH</b>	Muchos microorganismos están adaptados a un pH neutro (7). Las condiciones altamente ácidas o alcalinas tendrán un efecto inactivador. La adición de cal a la excreta en las letrinas secas y a los lodos residuales puede incrementar el pH e inactivará a los microorganismos. La velocidad de inactivación depende del valor de pH, por ejemplo, es mucho más rápido a un pH de 12 que a uno de 9.
<b>Amoníaco</b>	En ambientes naturales, el amoníaco (NH <sub>3</sub> ) químicamente hidrolizado o producido por bacterias puede ser tóxico para otros organismos. La adición de químicos generadores de amoníaco facilitará la inactivación de patógenos en la excreta o los lodos residuales (Ghigletti <i>et al.</i> , 1997; Vinnerås <i>et al.</i> , 2003).
<b>Humedad</b>	La humedad está relacionada con la supervivencia del organismo en el suelo y en las heces. Un suelo húmedo favorece la supervivencia de los microorganismos y un proceso de secado reducirá el número de patógenos.
<b>Radiación Solar/ Rayos UV</b>	La radiación ultra violeta reducirá el número de patógenos. Esta es usada como un proceso para el tratamiento tanto de agua potable como de aguas residuales. En el campo el tiempo de supervivencia será menor en el suelo y en la superficie de los cultivos donde la luz solar pueda afectar a los organismos.
<b>Presencia de otros microorganismos</b>	La supervivencia de los microorganismos es generalmente más larga en el material que ha sido esterilizado que en una muestra ambiental que contiene otros organismos. Los organismos pueden afectarse unos a otros por depredación, liberación de sustancias antagonistas o competición.
<b>Nutrientes</b>	Las bacterias se desarrollarán en el ambiente, si los nutrientes están disponibles y otras condiciones son favorables. La bacteria entérica adaptada para el tracto gastrointestinal no es siempre capaz de competir con organismos nativos por los escasos nutrientes, limitando su habilidad de reproducirse y de sobrevivir en el ambiente.
<b>Otros factores</b>	La actividad microbiana depende de la disponibilidad de oxígeno. En el suelo, el tamaño de las partículas y la permeabilidad impactarán la supervivencia microbiana. En el suelo así como en los ambientes de las aguas residuales y del agua, varios organismos y componentes químicos inorgánicos pueden afectar la supervivencia de los microorganismos.

El objetivo del tratamiento higiénico de la excreta es la inactivación de los agentes patógenos presentes para de esta forma hacerla segura en la aplicación en cultivos. Para determinar la duración y las condiciones del tratamiento, es necesario estimar la supervivencia de varios microorganismos en la excreta como



una función del tiempo. La tabla 1.9 describe los diferentes tratamientos higiénicos para emplear la excreta humana.

**Tabla 1.9 Descripción de los tratamientos higiénicos en la excreta humana (Niwagaba *et al.*, 2009b; Schönning y Stenström, 2004)**

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN
<b>ORINA</b> <b>Almacenamiento</b>	<p>El almacenamiento de la orina a temperatura ambiental es considerado una opción viable de tratamiento. Los tiempos recomendados de almacenamiento a temperaturas entre los 4 y 20 °C varían entre uno y seis meses para sistemas de gran escala dependiendo del tipo de cultivo que sea fertilizado.</p> <p>Para viviendas unifamiliares, la orina puede ser aplicada directamente a cualquier cultivo sin ser almacenada, siempre y cuando transcurra un mes entre la fertilización y la cosecha si no ha habido contaminación fecal cruzada. Se debe evitar diluir la orina.</p>
<b>HECES</b> <b>Almacenamiento</b>	<p>El almacenamiento es la forma más simple de tratar las heces. La inactivación de patógenos es generalmente lenta y tiempos de almacenamiento en el ámbito de meses para la reducción bacteriana a años para algunos helmintos son necesarios para alcanzar una higienización segura del producto.</p> <p>Un simple almacenamiento a temperatura ambiental, el pH y la humedad no son en consecuencia considerados prácticas seguras excepto cuando el tiempo de almacenamiento es de años (basado en la reducción de los helmintos del suelo).</p> <p>Adicionalmente, la sola adición de tierra o aserrín luego de la deposición como un material de recubrimiento y acondicionador debe ser desalentada.</p> <p>Sin embargo, se puede aplicar el almacenamiento en combinación con otras "barreras seguras".</p>
<b>Composta termofílico</b>	<p>Es un proceso biológico que requiere de un manejo capacitado para funcionar bien. Es importante mantener una composición adecuada de materiales para alcanzar temperaturas lo suficientemente altas para una inactivación eficaz de los patógenos. El compostaje es desarrollado, preferentemente, como un tratamiento secundario a gran escala, los procesos deben ser aislados y monitoreados para garantizar la obtención de temperaturas termofílicas (&gt;50°C) en todo el material. El compostaje mesofílico a escalas menores necesita ser evaluado más a fondo.</p>
<b>Tratamiento alcalino y químico</b>	<p>La adición de ceniza o cal en el tratamiento primario a las heces es recomendada ya que facilitará la inactivación de patógenos y reducirá el riesgo de transmisión de enfermedades durante la manipulación y reúso del material. Esta reduce también el riesgo de olor y moscas en el inodoro. Los aditivos pueden influenciar la selección de las opciones de tratamiento secundario. Es necesaria una mayor evaluación para establecer las cantidades y calidad de aditivos que son necesarios para una reducción eficaz de los patógenos y su influencia en el tratamiento secundario. De igual forma en los tratamientos secundarios principalmente se considera la dosificación de químicos para eliminar los patógenos.</p>
<b>Incineración</b>	<p>La incineración de las heces producirá un fertilizante libre de patógenos y puede ser usado potencialmente como un tratamiento secundario, tanto a niveles de pequeña escala como gran escala. Los sistemas que usan incineración no han sido aún adecuadamente desarrollados y evaluados.</p>



## 1.6 FERTILIZACIÓN DE CULTIVOS

Como se ha mencionado en el inciso 1.3, por el contenido de nutrientes en la orina y heces se consideran residuos potenciales para utilizarlos como fertilizantes.

Un punto de inicio al decidir la dosis de aplicación de la orina y las heces son las recomendaciones locales para el uso convencional del N (preferentemente urea o fertilizantes de amonio) y fertilizantes de fósforo. Si no existen recomendaciones locales disponibles, se puede estimar las cantidades de nutrientes absorbidos por el cultivo (Richert *et al.*, 2010).

En la tabla 1.10 se resumen datos de remoción de nutrientes por tonelada de fracción comestible cosechada para algunos cultivos. Estas cantidades deben ser multiplicadas por la cosecha estimada para obtener las cantidades de nutrientes asimilados (Jönsson *et al.*, 2004).

**Tabla 1.10 Asimilación aproximada de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, Mg y S por toda el área (frutos, hojas, tallos, semillas) de la planta según un rendimiento dado. (IPNI, Instituto Internacional de Norte América y América Latina para la Nutrición de Plantas 2011, por sus siglas en inglés)**

CULTIVO	CANTIDAD t / ha	N Kg / ha	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Kg / ha	K <sub>2</sub> O Kg / ha	Mg Kg / ha	S Kg / ha
Maíz	12	298	128	298	73	37
Frijol	3.9	353	65	230	27	22
Algodón	1.6	202	71	168	39	34
Trigo	5.3	186	60	206	19	22
Cacahuete	4.4	269	44	207	28	23
Avena	3.5	129	45	162	22	21
Arroz	7.8	125	67	188	16	13
Jitomate	99	260	97	519	40	60
Col	88	302	71	279	40	72
Papa	65	301	101	612	56	25

La fertilización balanceada requiere mantener la proporción de nutrientes que las plantas extraen del suelo. Una tasa de aplicación correspondiente a la cantidad de nutrientes removidos por la fracción comestible del cultivo es menor que la tasa de aplicación necesaria para obtener la mayor producción del cultivo, especialmente en suelos con baja fertilidad. El fertilizante suministrado debe proveer nutrientes para las raíces, el cultivo y los residuos del cultivo removidos del campo; existen generalmente pérdidas adicionales de N, K y S, en particular a través de los lixiviados, y de N también por volatilización. Algunos nutrientes se pierden también si los residuos del procesamiento del cultivo no son devueltos al campo como fertilizante. Otro aspecto importante es que el P añadido es usualmente adsorbido



por el suelo, especialmente si el suelo es pobre en P. Por lo tanto, las cantidades calculadas en base a la tabla 1.10 establecen el nivel de aplicación mínimo necesario para mantener la fertilidad. Las tasas de aplicación más altas, a menudo del doble, son necesarias para incrementar simultáneamente la fertilidad del suelo, para obtener una alta producción en suelos pobres (Jönsson *et al.*, 2004).

### **1.6.1 Fertilización con orina**

La orina usada directamente o luego del almacenamiento es una alternativa de alta calidad y bajo costo a la aplicación de fertilizantes ricos en N en la producción vegetal. Los nutrientes contenidos en la orina están en forma iónica y su disponibilidad para las plantas es comparable con la de los fertilizantes químicos (Johansson *et al.*, 2001; Kirchmann y Pettersson, 1995; Kvarmo, 1998 citados por Richert *et al.*, 2010, 2005).

El área productiva que es necesaria para el uso de la orina depende de varios factores (Richert *et al.*, 2010):

- La demanda de nitrógeno y la tolerancia de los cultivos
- La concentración de nitrógeno en la orina colectada
- Las pérdidas de amoníaco en la aplicación de la orina
- La cantidad de cosechas que se pueden realizar al año
- La salinidad del suelo y el riesgo de convertirse en suelo salino

#### **1.6.1.1 Dosis de aplicación**

Sí existen recomendaciones para el uso de fertilizantes de N (urea, amonio o nitrato) en cultivos en una región específica, un buen inicio para saber cómo usar la orina es extrapolar estas recomendaciones a la dosificación de orina. La extrapolación se simplifica si la concentración de N contenida en la orina es conocida. Si no lo es, entonces una regla general es considerar una concentración de 3-7 gramos de N por litro de orina (Jönsson y Vinnerås, 2004; Vinnerås, 2001).

El uso de la orina se recomienda para la mayoría de cultivos. Al ser especialmente rica en N, es aconsejable dar prioridad a los cultivos que tienen valor y responden bien al N como la espinaca, coliflor, plantas ornamentales y maíz. No obstante, no existe ninguna razón para no usar la orina como fertilizante en otros cultivos, ya que las experiencias en todo el mundo muestran buenos resultados (Jönsson *et al.*, 2004).

#### **1.6.1.2 Estrategias y tiempo de aplicación**

Cuando las plantas son fertilizadas por primera vez, el rendimiento aumenta a una determinada tasa de aplicación, y luego se reduce si la tasa de aplicación es mayor. Sin embargo, tanto la cantidad como la calidad del rendimiento son importantes y el contenido de N disponible puede afectar la calidad, positiva o negativamente. El momento de la aplicación también es importante, ya que la



absorción de nutrientes por la mayoría de los cultivos disminuye después de que el cultivo entra en la fase reproductiva (Richert *et al.*, 2010).

Si el cultivo se fertiliza dos veces, la segunda fertilización se puede realizar después de aproximadamente un cuarto del tiempo entre la siembra y la cosecha, pero depende de las necesidades del cultivo. El cultivo también puede ser fertilizado continuamente. Sin embargo, una vez que el cultivo entra en su etapa reproductiva las plantas consumen pocas cantidades de nutrientes. Después de esta etapa los nutrientes son principalmente reubicados dentro de la planta. Esto se aprecia plenamente en las recomendaciones sobre el uso de fertilizantes químicos (Schönning y Stenström, 2004; WHO, 2006).

La aplicación de orina puede ser benéfica para el rendimiento de los cultivos, y sobre todo en suelos deficientes en fósforo cuando éste se incrementa. Sin embargo, se debe tener cuidado con el uso de la orina de una manera más eficiente en los suelos y en las regiones propensas a la eutrofización de los cursos de agua (Richert *et al.*, 2010).

Un aspecto que se enfatiza a menudo es el riesgo de lixiviación de los nutrientes. En regiones donde hay fuertes lluvias durante la etapa de cultivo, ésta podría ser la causa de pérdida de los nutrientes por la aplicación repetida de orina (Jhönson *et al.*, 2004).

### **1.6.1.3 Técnicas de aplicación**

La orina puede aplicarse pura (sin dilución) o diluida con agua, tal como se practica en muchos lugares. Los niveles de dilución varían entre aproximadamente 1:1 (1 parte de agua y 1 parte de orina) a 1:3, que es la más común.

La dilución tiene la ventaja de disminuir el riesgo de una sobre fertilización por aplicar la orina en dosis tan altas que se vuelva tóxica para el cultivo. Sin embargo, independientemente de si la orina diluida o concentrada, es un fertilizante y debe, así como los fertilizantes químicos muy concentrados, ser aplicada en las dosis correspondientes de aplicación de N deseadas, aunque se debe añadir agua de acuerdo a las necesidades de las plantas.

La orina diluida debe ser manipulada de la misma manera que la concentrada; para evitar malos olores, pérdidas de amoníaco, generación de aerosoles, quemaduras foliares y posible contaminación de las plantas por patógenos remanentes. La orina deberá ser aplicada cerca de la planta, e incorporada en la tierra; la fertilización foliar no se recomienda, debido a los olores, las pérdidas de N y al riesgo de toxicidad e higiene (Richert *et al.*, 2010). La aspersión de la orina en el aire debe de igual manera evitarse por el riesgo de pérdida de N por emisiones gaseosas de amoníaco (Johansson *et al.*, 2001; Rodhe *et al.*, 2004) y el riesgo higiénico de los aerosoles.

La elección de la técnica de aplicación varía para los diferentes tipos de cultivos. Una aplicación superficial es suficiente, sin embargo es posible aplicar varios



métodos. Para aquellos que se cultivan en filas, la orina se puede aplicar en una zanja al lado del cultivo. Para aquellos cultivos que se siembran en surcos, con separación entre las plantas, la orina puede ser aplicada en un hoyo excavado junto al cultivo. En el caso de fertilizar árboles, la orina se dispersa en un círculo alrededor del árbol, que corresponde a la circunferencia de las ramas. Todas estas recomendaciones de aplicación son también benéficas desde la perspectiva de salud, porque evitan el contacto directo con la orina (Richert *et al.*, 2010; Jönsson *et al.*, 2004).

Para un mejor efecto fertilizante y evitar las pérdidas de amoníaco, la orina debe ser incorporada en el suelo tan pronto como sea posible (Richert *et al.*, 2010; Rodhe *et al.*, 2004; Johansson *et al.*, 2001).

La aplicación de la orina a escala mayor se hace con el equipo normalmente utilizado para el riego de fertilizantes en los campos. En las zonas donde el suelo es muy compacto, se debe tener cuidado para mantener la orina tan concentrada como sea posible. En estos casos la orina sin dilución es recomendada, y la aplicación se realiza justo antes de las lluvias.

La irrigación por goteo con la orina como fertilizante es otra técnica de posible aplicación. Sin embargo, cuando se utiliza esta técnica se deben tomar medidas para evitar bloqueos por la precipitación de sales, ya que el agua de dilución normalmente contiene magnesio y calcio (Richert *et al.*, 2010)

#### **1.6.1.4 Experimentación de la dosificación de orina como fertilizante en diferentes cultivos**

Se han realizado varios proyectos de investigación alrededor del mundo basados en el poder fertilizante de la orina en diferentes tipos de cultivos, algunos de los cuales se describen a continuación:

##### **a) Lechuga**

Guadarrama *et al.*, 2002, experimentaron con el cultivo de lechugas en un invernadero en Temixco, México. Realizaron ensayos comparando el rendimiento de la orina, la composta, la mezcla de orina y composta y un tratamiento sin fertilización. La dosis aplicada fue de 150 kg N / ha en todos los ensayos, excepto para el tratamiento sin fertilización. El mejor resultado fue obtenido con la orina, debido a la disponibilidad de N.

Morgan *et al.*, 2003, de igual forma experimentaron el cultivo de lechuga en Zimbabwe, África, comparando los resultados obtenidos después del riego con sólo agua y con orina diluida. Las macetas con lechugas se regaron primero con agua, por un periodo de 1-2 semanas después del trasplante. Posteriormente se administró 0.5 L de orina diluida 1:3 (orina: agua) tres veces por semana; La



aplicación de orina diluida, 125 mL, de orina por planta cada semana, mejoró de 2 a 3 veces el crecimiento de las lechugas.

### **b) Espinaca**

Morgan *et al.*, 2003, también realizaron pruebas con espinaca. Aplicando la misma cantidad de orina diluida que para la lechuga (0.5 L de orina diluida 1:3, tres veces por semana). La aplicación de tal dilución mejoró 6 veces el crecimiento de la espinaca.

Mnkeni *et al.*, 2006, basaron su experimentación en el efecto fertilizante de la orina en el cultivo de espinaca en la ciudad de Alice, Sudáfrica. Los tratamientos incluían tres cantidades de orina diluida (una, dos y tres veces por semana), y un fertilizante inorgánico, aplicando la cantidad recomendada para espinaca (100 kg N / ha  $\equiv$  0.6g N / 12 kg de suelo en las macetas) y un tratamiento regado sólo con agua. Se obtuvieron 2 cosechas, en la primer cosecha el mejor resultado se obtuvo de la aplicación de orina diluida una vez por semana (3.6 g N / maceta), y para la segunda cosecha se obtuvo de la aplicación de orina diluida 2 veces por semana (6.4 g N / maceta).

### **c) Col**

Mnkeni *et al.*, 2006, al igual que con la espinaca, realizaron ensayos con col. Los tratamientos incluían tres cantidades de orina diluida (una, dos y tres veces por semana), fertilizante inorgánico, aplicando la cantidad recomendada para la col (200 kg N / ha  $\equiv$  1.2g N / 12 kg de suelo en las macetas) y un tratamiento regado sólo con agua. La aplicación de la orina diluida tuvo casi el mismo resultado que con la espinaca. El mejor efecto en el crecimiento de la col se obtuvo con la aplicación de la dilución una vez por semana (3.6 g N / maceta), lo que mejoró el rendimiento 5 veces más.

Surendra *et al.*, 2007, utilizaron la orina como fertilizante en el cultivo de la col, comparada con un tratamiento con fertilizante industrial y uno sin fertilización. La dosis aplicada fue de 180 kg N / ha, para el tratamiento con orina como fertilizante químico. El mejor crecimiento se obtuvo con la orina. Indican que la orina es una buena alternativa comparada con los fertilizantes industriales.

### **d) Jitomate**

Morgan *et al.*, 2003, al igual que sus ensayos con lechuga y espinaca, también los realizaron para el caso de jitomate. Las macetas con jitomates se regaron primero con agua, por un periodo de 1 mes después del trasplante. Después se administró 0.5 L de orina diluida 1:3 (orina: agua) tres veces por semana; La aplicación de orina diluida mejoró 3.6 veces el crecimiento de los jitomates comparada con los tratamientos regados con agua.

Mnkeni *et al.*, 2006, evaluaron la orina como fertilizante comparándola con la aplicación de un fertilizante inorgánico (urea) y un tratamiento regado sólo con



agua. Las dosis aplicadas de N fueron: 50, 100, 200 y 400 kg de N / ha, tanto para la orina como la urea. En sus resultados confirma que la orina humana es tan eficaz desde el punto de vista agronómico como fuente de N como la urea. Mencionan que el uso de la orina humana en altas dosis de aplicación puede dar lugar a la salinización del suelo.

Surendra *et al.*, en 2009 evaluaron el uso de la orina humana y las cenizas de madera como fertilizante en un invernadero ubicado en la ciudad de Kuopio, Finlandia. Los jitomates se cultivaron en macetas tratadas con 135 kg de N / ha, aplicaron fertilizante inorgánico, orina más cenizas, solamente orina y un control (sin fertilización). Las plantas fertilizadas con orina produjeron igual número de frutos que las plantas con fertilizante mineral y 4.2 veces más frutos que las plantas no fertilizadas. Los resultados sugieren que la orina con o sin cenizas de madera se pueden utilizar como un sustituto de los fertilizantes minerales para aumentar el rendimientos en cultivos de jitomate, sin que represente un riesgo microbiano o químico.

#### **e) Betabel rojo**

Surendra *et al.*, en 2010 investigaron el efecto de la fertilización con orina humana y cenizas de madera sobre el rendimiento y la calidad en el betabel rojo, sembrado sobre parcelas al aire libre en la Universidad de Kuopio. La dosis de aplicación fue de 133 kg de N / ha, teniendo como tratamientos: fertilizante mineral, orina más cenizas, solo orina y un control no fertilizado. La orina como fertilizante se aplicó en los días de cultivos 1, 18, 28 y 36; a una tasa de 455 mL / parcela. Las cenizas de madera se aplicaron al tercer día después de la aplicación de la orina, con una dosis de 61.05 g / parcela en cada ocasión. El estudio reveló que la orina con o sin cenizas aumenta el rendimiento en el crecimiento del betabel rojo; además que presentan una calidad microbiana y química similar a las plantas con fertilizante mineral. En la tabla 1.11 se resumen condiciones de dosificación de orina en diferentes cultivos que deben tomarse en cuenta para establecer las condiciones experimentales de este trabajo.

#### **1.6.2 Fertilización con heces**

El efecto fertilizante de las heces varía mucho más que el efecto de la orina debido a varios factores. La cantidad de N que se encuentra en forma mineral en las heces varía considerablemente según la estrategia de tratamiento aplicada. El P es particularmente valioso para la planta en su desarrollo inicial e importante para un buen desarrollo de las raíces. Otra razón es que se usan agentes desecantes en los tratamientos con heces y estos contribuyen con el contenido total de nutrientes y materia orgánica.

Además de proveer macro y micronutrientes, las heces contienen materia orgánica que sirven como alimento para los microorganismos y es importante para mejorar la estructura del suelo. Sin embargo, el riesgo de altas concentraciones de patógenos en las heces es grande, por lo tanto, es importante que las heces sean



manipuladas de tal manera que los riesgos de transmisión de enfermedades sean mínimos (Jhönson *et al.*, 2004).

**Tabla 1.11 Experiencias utilizando la orina como fertilizante en diferentes tipos de cultivos**

TIPO DE CULTIVO	CANTIDAD APLICADA	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	TIEMPO DE CULTIVO Y COSECHA	COLECTA DE ORINA	REFERENCIA
<b>Betabel rojo</b>	133 kg de N/ha	La orina como fertilizante (8.36 g de N / L, 0.7 g de P / L, y 2 g de K / L) se aplicó en los días de cultivos 1,18, 28 y 36; aplicando 455 ml de orina/ parcela. Las cenizas de madera (37 g de P / kg y 137 g de K / kg) se aplicaron al tercer día después de la aplicación de la orina, a una dosis de 61.05 g / parcela en cada ocasión.	84 días	La orina se colectó de hogares particulares y se almacenó durante 6 meses.	Surendra <i>et al</i> , 2010
<b>Jitomates</b>	135 kg de N/ha	La orina como fertilizante (N=8.36, P =0.7, K=2.0 g/L) se aplicó en los día 6, 14, 34. 41 y 48 a una concentración de 16.2 ml /maceta. De manera similar, las ceniza de madera (P = 36, K = 137 g / kg) se aplicaron a los 3 días después de la aplicación de la orina; a una dosis de 20.14 g / planta en cada ocasión	La cosecha comienza el día 62 y termina el 88.	La orina se colectó de hogares particulares. Se almacenó durante 6 meses a 7 °C.	Surendra <i>et al</i> , 2009
	50, 100, 200 and 400 kg de N/ha	Los tratamientos con orina se aplicaron mediante la medición de la cantidad necesaria de orina en 100 ml de agua, Seguido de agua adicional para llevar el suelo a una saturación de aproximadamente el 80% de la capacidad de retención de agua en suelo.	72 días	La orina se colecto de los sanitarios de hombres en hostales, y fue almacenada en un cuarto frío a 16 °C.	Mnkeni <i>et al</i> , 2006
	Orina diluida 1:3 (orina: agua)	Las macetas con jitomates se regaron primero con agua, por un periodo de 1 mes. Después de este tiempo, se administró 0.5 L de orina diluida 1:3 (orina: agua) tres veces por semana.	4 meses	La orina se colectó de baños con separador de orina.	Morgan <i>et al</i> , 2003
<b>Espinaca</b>	Orina diluida 1:3 (orina:agua)	Los tratamientos incluyen 3 aplicaciones de orina diluida (una, dos y tres veces por semana). Se comenzó el tratamiento 5 días después del trasplante. Se plantaron dos plantas de espinaca por maceta. La concentración de N de la orina diluida fue 0,18% por lo que la aplicación acumulativa de los diferentes tratamientos durante el período es traducido a 3,6, 6,4 y 9,6 g N/ 12 kg de suelo en las macetas, respectivamente, para uno, dos y tres aplicaciones por semana. Esto se tradujo a 600, 1067 y 1567 kg de N / ha, respectivamente.	Se realizaron 2 cosechas, una al primer mes y otra al segundo mes.	La orina se colecto de los sanitarios de hombres, y fue almacenada en un cuarto frío a 16 °C.	Mnkeni <i>et al</i> , 2006
	Orina diluida 1:3 (orina:agua)	Las espinacas se cultivaron en macetas. Primero se regaron con agua, por un periodo de 1-2 semanas después del trasplante. Posterior de este tiempo, se administró 0.5 L de orina diluida 1:3 (orina: agua) tres veces por semana.	30 días	La orina se colectó de baños con separador de orina.	Morgan <i>et al</i> , 2003



**Tabla 1.11 Continuación. Experiencias utilizando la orina como fertilizante en diferentes tipos de cultivos**

TIPO DE CULTIVO	CANTIDAD APLICADA	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	TIEMPO DE CULTIVO Y COSECHA	COLECTA DE ORINA	REFERENCIA
Lechuga	150 kg de N/ha	Se sembraron lechugas dentro de un invernadero. Se instaló un sistema de riego por goteo, cubierto con plástico que mantenía la humedad y evitaba el crecimiento de malas hierbas. En cada cama de siembra de 5 m <sup>2</sup> había 16 plantas de lechuga.	No especificado	No especificado	Guadarrama <i>et al.</i> , 2002
	Orina diluida 1:3 (orina:agua)	Las lechugas se sembraron en macetas. Primero se regaron con agua, por un periodo de 1-2 semanas después del trasplante. Después de este tiempo, se administró 0.5 L de orina diluida 1:3 (orina: agua) tres veces por semana.	30-33 días	La orina se colectó de baños con separador de orina.	Morgan <i>et al.</i> , 2003

### 1.6.2.1 Dosis de aplicación

Las dosis a las cuales la mayoría de los productos fecales pueden ser aplicados varían notablemente. Los dos efectos más benéficos obtenidos de la mayoría de productos fecales son el suministro de P, K y de materia orgánica, y son logrados con tasas de aplicación muy variadas.

Cuando se trata del contenido de materia orgánica en el producto fecal, se necesitan tasas más altas de aplicación para alcanzar efectos en el sistema del suelo, que a su vez, den una producción mayor. Sin embargo, un contenido alto y estable de materia orgánica del suelo se alcanza únicamente durante largos períodos de tiempo. La materia orgánica en el material aplicado, por ejemplo, heces secas o composta, no es tan estable como el humus del suelo y se degradará en el suelo. La ventaja de esto es que mientras ésta más se degrade, más se mineralizarán los nutrientes y estarán disponibles para las plantas. La desventaja es que esta degradación significa que el contenido de materia orgánica disminuirá y por consiguiente se necesitarán aplicaciones continuas para aumentar permanentemente el contenido de materia orgánica del suelo.

Una aproximación de las tasas de aplicación se considera del orden de 20-150 toneladas de producto fecal por hectárea. Las tasas de aplicación normales para estiércol de granja corresponden al intervalo de 20 a 40 toneladas por hectárea (Jhönson *et al.*, 2004).

### 1.6.2.2 Estrategias y tiempo de aplicación

Las formas de aplicación de las heces al suelo son varias y dependen del tratamiento que se les haya dado con anterioridad, pueden dosificarse en forma de cenizas, como composta o humus (compostaje termofílico), heces secas por deshidratación, residuos de digestión anaerobia. Cada una de ellas aporta



diferentes características al material final, las cuales se deben contemplar para obtener el mejor resultado a la hora de su aplicación.

Dos de los mayores beneficios de las heces son su contenido de P y de materia orgánica. Para usarlas completamente, la materia fecal debe ser aplicada a una profundidad donde el suelo permanezca húmedo, ya que el P solo está disponible para las plantas en la medida en que se disuelve en el agua del suelo húmedo. De igual manera, la capacidad de retención de agua y la capacidad de amortiguamiento de la materia orgánica son utilizadas en toda su extensión solamente en condiciones húmedas. Es así que el fertilizante de origen fecal, indiferentemente de si es en forma de cenizas, composta, residuos de digestión o lodos tratados, debe ser aplicado a tal profundidad y de tal manera que esté totalmente cubierto el suelo.

La técnica varía en función de la aplicación y el cultivo deseado. Si la dosis de aplicación deseada es alta, es decir, se dispone de grandes cantidades en relación con el área a ser fertilizada, las heces pueden ser enterradas, cubiertas con una capa de suelo no mezclada con ningún producto fecal, formando un lecho. La excavación se hace a pequeña escala, mientras que a gran escala se prefiere el arado, ya que cubre bien el producto con suelo que no ha sido mezclado. Si la dosis de aplicación es baja, el producto fecal es preferible aplicarlo en surcos cubiertos por suelo sin mezclar. A más bajas dosis de aplicación, el producto fecal puede ser aplicado en agujeros cerca de donde serán sembradas las plantas.

Indiferentemente de cómo han sido tratadas las heces, deberán ser aplicadas antes de la siembra por la disponibilidad de los nutrientes y minimizar la contaminación. Las heces deben ser aplicadas de tal manera que entren en contacto con la solución del suelo, que puede disolver y transportar los nutrientes a las raíces.

Las heces contienen inicialmente grandes cantidades de patógenos y, por consiguiente, es deseable colocar varias barreras entre ellas y la cosecha de alimentos, para minimizar el riesgo de transmisión de enfermedades por el cultivo fertilizado con heces. Los tratamientos secundarios (composta, tratamiento termofílico, tratamiento alcalino, químico e incineración) son una de estas barreras, la aplicación y la cobertura cuidadosa de las heces tratadas antes de la siembra es otra barrera contra la transmisión de enfermedades (Jhönson *et al.*, 2004).

### **1.6.2.3 Experimentación dosificando heces como fertilizante en diferentes cultivos**

Las experiencias realizadas para verificar el poder fertilizante de las heces son mucho menores en comparación con las de la orina. A continuación se realiza una descripción de ellas.



## **a) Heces secas por deshidratación**

Mnkeni y Austin, en 2009 evaluaron la efectividad de las heces humanas como fuente de nutrientes en la provincia de Alice, Sudáfrica, en el cultivo de col. Los tratamientos fueron dispuestos en un diseño de bloques al azar con cuatro replicas, que consistieron en un control, una dosis de estiércol de cabra equivalente a 100 kg de N / ha y de cuatro dosis de heces humanas y fertilizante industrial aplicando cantidades equivalentes a 50, 100, 200 y 400 kg de N / ha.

Sus resultados demostraron que con las heces humanas se obtuvieron mejores resultados que con el estiércol de cabra, pero menos que con el fertilizante inorgánico. Las heces humanas son una mejor fuente de K y P para las plantas que el estiércol de cabra. Las heces humanas aumentan el pH del suelo, por lo que tiene un gran potencial para mejorar el crecimiento de los cultivos en suelos ácido. Debido a que las heces humanas son una fuente deficiente de N, sugieren la co-aplicación del material con fertilizantes inorgánicos y de esta forma obtener una mayor efectividad agronómica

Austín, 2006, evaluó el efecto de la materia fecal en los cultivos de zanahoria y espinaca en la Universidad de Pretoria, Sudáfrica. El material fecal se extrajo de baños diversificadores de orina (UD, por sus siglas en inglés), se mezcló con suelo local y se expuso a la intemperie durante 4 meses. Para el cultivo se utilizaron parcelas experimentales, cada cultivo fue sembrado en dos lotes, uno de ellos utilizado como control, mientras que el otro se dividió en tres secciones. Cada parcela fue tratada con una dosis de aplicación diferente de materia fecal, a excepción de la parcela de control en donde no se añadió material fecal. La demanda de nitrógeno de los cultivos correspondía a 50 kg N / ha para las zanahorias y 100 kg de N / ha para espinacas; por lo tanto, el material se aplicó en las zanahorias en una cantidad de 0, 7, 12.5 y 35 t / ha, mientras que para espinacas fue de 0, 1.3, 19.0 y 37.5 t / ha.

La finalidad principal del estudio fue evaluar el efecto microbiano de las heces aplicadas en el cultivo. Sus resultados demostraron que la cantidad de bacterias y hongos contenidos solo eran perceptibles para la dosis más alta (>35 t / ha), mientras que el contenido de huevos de helminto variaba tanto en las hojas como el tallo, dependiendo de la cantidad de material aplicado.

## **b) Compostaje (humus)**

Peter Morgan en 2003 realizó una serie de experimentos en Zimbabwe, África, usando heces en composta a bajas temperaturas como fertilizante en el cultivo de hortalizas. El humus provenía de una fosa alterna que se utiliza en intervalos de 1 año, agregando suelo y cenizas periódicamente. Verduras como espinaca, cebollín lechuga, pimiento verde, jitomate y cebolla se cultivaron en macetas con suelo de la localidad y su crecimiento se comparó con plantas sembradas con una mezcla 50 / 50 de humus / suelo local. Todos sus resultados muestran un dramático incremento en el rendimiento de los vegetales, resultantes de la mejora del suelo local pobre con el humus.



### c) Digestión anaerobia

Åkerhielm y Stintzing llevaron a cabo durante 1999-2003 ensayos de campo en el sur de Suecia con el fin de evaluar el efecto fertilizante de la digestión anaerobia de los residuos orgánicos de los hogares en la producción de cereales.

Las pruebas de campo fueron diseñados como ensayos de parcelas divididas con tres réplicas; siete tratamientos en 1999, 2000 y 2003 y ocho tratamientos en 2001 y 2002. Los residuos de digestión (DR, por su siglas en inglés), con un contenido de materia seca de 3.1 %, se compararon con los fertilizantes minerales (todos los años) y las heces de ganado lechero (2001-2003).

Los resultados muestran que la DR es un fertilizante que puede sustituir a los fertilizantes minerales en la producción de cereales. Los balances de nutrientes muestran mayores excedentes de nitrógeno para la DR y las heces de ganado en comparación a los fertilizantes minerales. Con los balances de nutrientes también mostraron pequeños déficit relativo de fósforo al utilizar los residuos digeridos como fertilizante. En la tabla 1.12 se resume información relativa a la aplicación de heces en cultivos con diferentes características, muy importantes para establecer las condiciones experimentales de aplicación de heces en el presente trabajo.

**Tabla 1.12 Experiencias aplicando heces como fertilizante en diferentes tipos de cultivos**

APLICACIÓN	TIPO DE CULTIVO	DOSIS APLICADA	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	TIPO DE HECES	BIBLIOGRAFÍA
Heces secas por deshidratación y almacenamiento	Col	50, 100, 200, and 400 kg N/ha	Las muestras de estiércol seco de cabra y humana se tamizaron a través de un tamiz de 8 mm antes de la aplicación. Todos los tratamientos de estiércol fueron difundidos e incorporados manualmente en la parte superior del suelo 200 mm usando un azadón seguido por el riego, una semana antes de que las coles fueran trasplantadas. El riego en general se componía de dos ciclos de riego de 3 horas por semana.	Heces humanas y de cabra	Mnkeni y Austin 2009
Heces secas, expuestas a la intemperie.	Espinaca	0, 1.3, 19.0 y 37.5 t / ha de heces	Una muestra compuesta de 25 kg de materia fecal seca fue mezclada con tierra vegetal local. Este material ha sido extraído de baños UD y se dejó a la intemperie durante cuatro meses. Se utilizaron unas parcelas experimentales de 2 m x 9m. El material fue mezclado a una profundidad de 100 mm. Las semillas se sembraron a una profundidad de 50 mm. El patrón dentro de los bloques fue de 300 mm en filas separadas y las semillas fueron espaciadas 50 mm dentro de las filas. La espinaca se cosechó después de 7 semanas y las zanahorias después de 12 semanas. En cada caso, toda la planta fue sacada de la tierra, cortadas y extraídas las raíces y las hojas por separado.	Heces humanas secas a la intemperie	Austin, 2006
	Zanahoria	0, 7, 12,5 y 35 t/ha de heces			



**Tabla 1.12 Continuación. Experiencias aplicando heces como fertilizante en diferentes tipos de cultivos**

APLICACIÓN	TIPO DE CULTIVO	DOSIS APLICADA	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	TIPO DE HECES	BIBLIOGRAFÍA
<b>Composta (humus)</b>	Espinaca, cebollín, lechuga, pimiento verde, tomate y la cebolla	Mezcla 50/50 (Humus y suelo local)	Para este método se utilizan un inodoro suplente a intervalos de 12 meses entre dos pozos poco profundos. Hortalizas como espinacas, <i>covo</i> , lechugas, pimiento verde, tomates y cebollas fueron cultivadas en macetas de 10 L con suelo vegetal local pobre, y su crecimiento fue comparado con plantas cultivadas en contenedores similares llenos con una mezcla 50/50 del mismo suelo vegetal local pobre / con humus proveniente del compostaje de heces humanas y orina	Excreta Humana	Morgan, 2003.
	Árboles frutales: mango y plátano	No especificado.	Se excava una fosapoco profunda (0.6 – 1 m de profundidad) donde es colocado un baño de losa portátil y es usado por un tiempo aproximado de 12 meses. Regularmente se agregan cenizas de madera y suelo local. Una vez casi llena es rellenada con suelo local y se planta un árbol joven a una profundidad de 10 cm a 15 cm.	Excreta Humana	Morgan, 2003.
<b>Residuos de procesos de digestión</b>	Cebada y avena	No especificado.	Se evaluó el efecto de la digestión anaerobia, de una fuente separada de residuos procedentes de los hogares; como fertilizante en la producción de cereales. Las pruebas de campo se diseñaron como ensayos en parcelas divididas con tres réplicas con siete y ocho tratamientos. Se comparó el residuo de la digestión anaerobia con fertilizantes minerales y las heces de ganado lechero. Se evaluaron dos estrategias diferentes de propagación, y la aplicación se realizó en el momento de la siembra, así como cuando el cultivo tenía entre 15 y 20 cm de altura.	Residuo de digestión anaerobia y heces de ganado lechero.	Åkerhielm, <i>et al</i> 2003



# 2

## METODOLOGÍA

---

En este capítulo se describe los métodos utilizados para experimentar el cultivo de jitomate en suelo ácido dosificando orina y heces humanas, como respuesta a la problemática de disposición de ese tipo de residuos en el medio rural y para investigar su posible aplicación como fertilizantes. Se describen las técnicas utilizadas para la caracterización de los materiales empleados, así como los criterios seleccionados para el desarrollo del cultivo hasta su cosecha. Se detallan las tareas realizadas desde el acondicionamiento de las macetas y trasplante de las plántulas hasta el traslado de las muestras al laboratorio y las determinaciones efectuadas en éste último.

### 2.1 MATERIALES Y EQUIPOS

#### 2.1.1 Materiales

Para la caracterización del suelo, de la orina y las heces se utilizaron materiales tales como: jabón marca Extran y agua destilada para la limpieza de todo el material empleado en las pruebas, cristalería diversa de uso en el laboratorio, contenedores y envases de plástico. Para la manipulación de las heces y la orina, se tuvieron todas las precauciones necesarias para evitar el riesgo de contaminación por exposición durante todo el proceso experimental. Todas las disoluciones requeridas por las técnicas empleadas, se prepararon en el momento de su determinación, a partir de reactivos grado analítico.

El cultivo del jitomate se llevó a cabo en un invernadero experimental acondicionado en el Instituto de Ingeniería (I.I) UNAM (en el inciso 2.3.4.1 se describen sus especificaciones). Desde la siembra hasta la cosecha se utilizaron los siguientes materiales considerados como más importantes: 16 macetas de 10 L, como sustrato 8 Kg de suelo ácido por cada maceta, 4 mesas metálicas con base de madera para soportarlas, semillas de jitomate guaje (ver inciso 2.3.2.3), agua destilada para el riego, un insecticida orgánico para el control de plaga y material de jardinería.



### 2.1.2 Equipos e Instrumentos

A continuación se describen los equipos utilizados de acuerdo a los parámetros seleccionados para la caracterización del suelo y los residuos.

Para pesar el suelo de cada maceta se usó una báscula marca Oken Express; para las determinaciones analíticas en el laboratorio las muestras se pesaron en una balanza marca Shimadzu, modelo AUY-120, y una báscula OHAUS, modelo YS2101.

En las mediciones de pH, CE y potencial redox en las muestras se utilizó el equipo marca WTW modelo Multi 340i/ SET, con sus diferentes electrodos. Para las determinaciones de nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) se usó un espectrofotómetro marca Merck, línea Spectroquant, modelo Nova 60, con sus correspondientes reactivos. Para el análisis del nitrógeno Kjendhal y amoniacal se utilizó un digestor, un lavador y un destilador marca B.U.C.H.I, unidades K-424, B-414 y K-350, respectivamente. Para el cálculo de los sólidos en sus diferentes formas se usó una estufa marca FELISA y una mufla marca SYBRON, modelo Thermolyne 1500. La determinación de metales se llevó a cabo por dos técnicas: espectrofotometría de absorción atómica, en un equipo Perkin Elmer, modelo 1100B, flama aire-acetileno; y mediante un fotómetro de flama marca CORNING, modelo 400. En el caso de suelo, el pH se midió con un potenciómetro marca Hanna modelo HI8424; para la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se usaron dos centrifugas marca SOL-BAT, modelo C-300, y una L420, así como el agitador Eberbach de 110cpm. Para los lixiviados del suelo se utilizó un Lixiviador servocontrolado de 22 rpm construido en la Coordinación de Instrumentación del Instituto de Ingeniería. Las muestras líquidas de experimentación se conservaron a 4 °C en refrigeración.

En el caso de las condiciones ambientales, los parámetros se monitorearon diariamente hasta la cosecha del cultivo. La intensidad luminosa se determinó diariamente en diferentes horarios con un luxómetro marca Sper Scientific, modelo 840020, la humedad relativa se cuantificó mediante un higrómetro marca AEMC, modelo CAA846, también a diferentes horarios. La temperatura se monitoreó con un termómetro de máximas y mínimas, marca Taylor.

## 2.2 CARACTERIZACIÓN

A continuación se describen los parámetros seleccionados para caracterizar cada uno de los materiales utilizados en la presente investigación.

### 2.2.1 Suelo

La tabla 2.1 enlista las determinaciones que se realizaron en el suelo antes y después del cultivo.

**Tabla 2.1 Parámetros seleccionados para caracterizar el suelo y método empleado**

PARÁMETRO	SÍMBOLO	NORMATIVIDAD O MÉTODO
Potencial hidrógeno	pH	<sup>a</sup> NOM-021-RECNAT-200
Conductividad eléctrica	CE	
Humedad	% Hum	<sup>b</sup> NMX-AA-034-SCFI-2001
Materia Volátil	MV	
Materias Fija	MF	
Nitrógeno total	Nt	NOM-021-RECNAT-2000
Fosfatos	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Método de digestión ácida para sedimentos, lodos y suelo EPA 3050B Colorimétrico análogo a EPA 365.2
Nitritos	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Método de digestión ácida para sedimentos, lodos y suelo EPA 3050B Colorimétrico análogo a EPA 354.1
Nitratos	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Método de digestión ácida para sedimentos, lodos y suelo EPA 3050B Colorimétrico análogo al ISO 7890/1
Capacidad de intercambio catiónico	CIC	NOM-021-RECNAT-200
Magnesio	Mg <sup>2+</sup>	
Calcio	Ca <sup>2+</sup>	
Sodio	Na <sup>+</sup>	
Potasio	K <sup>+</sup>	
Materia orgánica	MO	

<sup>a</sup> Estas dos mediciones se obtienen con el extracto de saturación para suelos descrito en la NOM-021-RECNAT-200.

<sup>b</sup> Se siguió el método normalizado para el análisis de aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas, siguiendo los lineamientos para muestras sólidas.

### 2.2.2 Orina

La tabla 2.2 muestra los parámetros seleccionados para la caracterización de la orina y la técnica o método empleado para su determinación, en este caso no existen normas específicas para caracterizar la orina, por lo que se siguió el método normalizado para el análisis de aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas.



**Tabla 2.2 Parámetros seleccionados para caracterizarla orinay método utilizado**

PARÁMETRO	SÍMBOLO	NORMATIVIDAD O MÉTODO
Potencial hidrógeno	pH	Potenciómetro
Conductividad eléctrica	CE	Electrodo de CE
Sólidos totales	ST	NMX-AA-034-SCFI-2001
Materia orgánica total	SVT	
Sólidos suspendidos totales	SST	
Sólidos disueltos totales	SD	
Sólidos sedimentables	SSe	
Nitrógeno total	Nt	<sup>a</sup> NMX-AA-026-SCFI-2001
Nitrógeno amoniacal	NH <sub>3</sub> -N	
Fosfatos	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	<sup>a</sup> Colorimétrico análogo a EPA 365.2
Nitritos	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Colorimétrico análogo a EPA 354.1
Nitratos	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Colorimétrico análogo al ISO 7890/1
Cloruros	Cl <sup>-</sup>	NMX-AA-073-SCFI-2001
Magnesio	Mg <sup>2+</sup>	NMX-AA-051-SCFI-2001
Calcio	Ca <sup>2+</sup>	
Sodio	Na <sup>+</sup>	
Potasio	K <sup>+</sup>	

<sup>a</sup> Se siguió el método normalizado para el análisis de aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas.

### 2.2.3 Heces

En general, con base en la bibliografía consultada, la caracterización de las heces consistió en la determinación de nitrógeno total Kjendhal, sólidos totales, volátiles y fijos, metales como: Mg, Ca, Na y K y aniones disueltos como son nitritos (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y fosfatos (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>). La tabla 2.3 enlista los parámetros determinados, así como el método utilizado; pero debido a que no existe una normatividad para caracterizar este tipo de residuos, se hicieron las adecuaciones en base a las normas consultadas.



**Tabla 2.3: Caracterización de heces y método utilizado**

PARÁMETRO	SÍMBOLO	NORMATIVIDAD O MÉTODO
Materia volátil	<b>MV</b>	<sup>a</sup> NMX-AA-034-SCFI-2001
Materia fija	<b>MF</b>	
Nitrógeno total	<b>Nt</b>	<sup>a</sup> NMX-AA-026-SCFI-2001
Magnesio	<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<sup>b</sup> Método de digestión ácida para sedimentos, lodos y suelo EPA 3050B
Calcio	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	
Sodio	<b>Na<sup>+</sup></b>	
Potasio	<b>K<sup>+</sup></b>	
Fosfatos	<b>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup></b>	<sup>b</sup> Método de digestión ácida para sedimentos, lodos y suelo EPA 3050B Colorimétrico análogo a EPA 365.2
Nitritos	<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	<sup>b</sup> Método de digestión ácida para sedimentos, lodos y suelo EPA 3050B Colorimétrico análogo a EPA 354.1
Nitratos	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<sup>b</sup> Método de digestión ácida para sedimentos, lodos y suelo EPA 3050B Colorimétrico análogo al ISO 7890/1

<sup>a</sup> Se siguió el método normalizado para el análisis de aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas, utilizando los lineamientos para muestras sólidas.

<sup>b</sup> Se consideró y trató a la muestra como lodos, ya que no existe una especificación para este tipo de material.

## 2.3 CONDICIONES EXPERIMENTALES

### 2.3.1 Suelo y nutrientes

#### 2.3.1.1 Suelo

Se utilizó como sustrato el suelo proveniente del Municipio de Los Reyes, Michoacán, con características ácidas. Con la finalidad de seleccionarlo se realizaron mediciones en campo de pH. El suelo ácido se localizó en las siguientes coordenadas N 19° 41' 9" y W 102° 30' 30" a una altitud de 1612 msnm.

El suelo fue secado a la sombra y tamizado con una malla de apertura de trama de 0.5 cm. Para su caracterización, se procesó el suelo según el método de cuarteo descrito en la NMX-AA-015-1985, se separaron 2 Kg y se pasó por un tamiz con apertura de trama de 2 mm para los correspondientes análisis; el resto se almacenó en costales y se utilizó como sustrato en las macetas. Esta información se puede complementar con la tesis de Concha, 2012 que involucra la técnica completa del muestreo de suelo en campo.



### **2.3.1.2 Orina**

La orina se colectó del mingitorio seco del sanitario de hombres ubicado en el primer piso del edificio 5 del Instituto de Ingeniería. Se almacenó por 6 meses en un contenedor de 70 L, de acuerdo con los lineamientos consultados para la utilización de orina como fertilizante.

La muestra de orina para caracterización y riego se extrajo del tanque de almacenamiento con previa homogenización y sedimentación, de la cual se separaron 4 litros en un garrafón destinado para el riego.

### **2.3.1.3 Heces**

Las heces fueron colectadas de dos familias de 4 integrantes cada una, de edades entre 12-50 años. Aproximadamente se colectaron 1.5 Kg de heces en base seca. El material fue secado siguiendo el procedimiento de secado de heces descrito por Guzmán, 2010, que en resumen consistió de dos etapas: la primera correspondiente a un secado solar por 48 horas, donde la muestra se extendió en un contenedor, para facilitar la pérdida de humedad; en la segunda etapa se realizó un secado controlado en estufa a 60° C por 48 horas. De esta forma se aseguró que las heces se secaran en su totalidad y se procediera a su molienda.

La molienda se realizó en un molino de discos, posteriormente a este paso se homogenizó la muestra en un recipiente de plástico y se pasó por un tamiz con apertura de trama de 2 mm. Se extrajeron 100 g para los parámetros de caracterización seleccionados siguiendo los procedimientos descritos en la tabla 2.3 y la muestra restante se almacenó hasta su utilización en las macetas.

## **2.3.2 Pruebas**

### **2.3.2.1 Tratamientos**

Con base a la bibliografía consultado y el objetivo de que evaluar la orina y las heces como fertilizantes, se definieron cuatro tratamientos los cuales se describen en la tabla 2.4 con las respectivas dosis de nitrógeno en orina y heces aplicadas.



**Tabla 2.4: Tipo de tratamientos**

No. de tratamiento	Descripción de tratamiento	Cantidad de N expresados en Kg /ha
T1	Blanco solo regado con agua destilada	0
T2	Dosis 1 de orina diluida con agua	135
T3	Dosis 1 de orina + Dosis 1 de heces	135 + 100
T4	Dosis 1 de orina + Dosis 2 de heces	135 + 200

#### **Tratamiento 1:**

En este tratamiento se regó el suelo solo con agua destilada con la finalidad de comparar los otros tratamientos a un blanco como referencia de crecimiento.

#### **Tratamiento 2:**

La dosis de orina 1 se estableció de acuerdo con la información recopilada de la bibliografía consultada respecto al uso de orina en cultivo de jitomate, para este tratamiento se dosificaron 634.5 mg N por cada maceta que es equivalente a los mejores resultados en el rendimiento de jitomate reportados por Surendra *et al*, 2009, de 135 Kg N / ha.

#### **Tratamiento 3:**

En este caso se seleccionó la dosis de orina experimentada por Surendra, *et al* 2009, de 135 Kg de N / ha, aplicando conjuntamente una dosis 1 de heces humanas, la cual se estableció con base en la experimentación de Mnkeni, *et al.*, 2009, en el cultivo de col; donde el mejor rendimiento lo logró aplicando 400 Kg de N / ha que equivalen a 21.6 t / ha de heces. Para el caso específico de este tratamiento se seleccionó una cuarta parte de la concentración sugerida por dicho autor correspondiente a 100 Kg N / ha, ya que no existe una experimentación directa en la aplicación de heces como fertilizante en el cultivo de jitomate, además de que la dosis se complementa con la dosis de orina.

#### **Tratamiento 4:**

Finalmente, para el tratamiento 4 de igual forma se fertilizó con una concentración 1 de orina = 135 Kg de N / ha, y una concentración 2 de heces = 200 Kg de N / ha.

### **2.3.2.2 Manejo específico de las pruebas**

#### **a) Muestra de suelo para macetas**

El suelo que se destinó para la experimentación se tenía almacenado en costales, se mezcló y homogenizó en una lona y con una pala (figura 2.1).



**Figura 2.1 Homogenización de suelo sobre lona**

#### **b) Acondicionamiento de macetas para los tratamientos con heces**

Con la finalidad de que las heces de los tratamientos T3 y T4 iniciaran un proceso de degradación antes del trasplante se acondicionaron las macetas de la siguiente forma:

- Se pesó la cantidad correspondiente de heces para cada maceta (heces 1 equivalente a 125 g de heces por maceta y heces 2 equivalente a 250g de heces por maceta).
- Se mezcló cada dosis con 7.5 Kg de suelo en bolsas de plástico y mezclando hasta la homogenización; para evitar la contaminación, todo el tiempo se utilizó mascarilla y doble guante.
- Una vez homogenizado, se vació el contenido de la mezcla heces más suelo en las macetas.
- Con la finalidad de que no quedaran expuestas las heces a la intemperie se colocó en la parte superior una capa de 0.5 Kg de suelo, completando los 8 Kg de suelo en cada maceta.
- Las macetas se humectaron al 80 % de saturación y se dejaron en la sombra por 15 días como lo muestra la figura 2.2 (a), para después hacer el trasplante, ver figura 2.2 (b).

### 2.3.2.3 Cultivo de jitomate

#### a) Semilla

Las semillas utilizadas fueron jitomate de la variedad guaje *Lycopersicon esculentum* (Solanáceas) envasados por la empresa Floraphil. Las cuales germinaron en semilleros de plástico, en todos los casos la siembra se realizó depositando la semilla a unos 2 o 3 cm de profundidad, cubriéndola con tierra negra como sustrato y regadas con agua destilada. Una vez que las plántulas alcanzaron las dimensiones deseables, 10 cm, fueron sembradas en las macetas



(a)

(b)

**Figura 2.2 Macetas de experimentación a) antes del trasplante b) después del trasplante**

#### b) Trasplante

El trasplante se realizó el día 24 de noviembre del 2010, por la mañana, las plántulas tenían entre 8 y 10 cm de altura y entre 6 y 10 hojas cada una, se hizo un pequeño hoyo en el suelo de la maceta de 10 cm de profundidad; con una pala se sacó la plántula del semillero con el cono de tierra negra, se insertó en el hoyo y fue tapado con el suelo retirado de la maceta, procurando que la planta quedará en posición vertical como lo muestra la figura 2.2. Finalmente se humedeció cada maceta con agua destilada.

#### c) Fertilización con orina

La fertilización con orina se realizó con base en la literatura consultada. Para el tratamiento T2, T3 y T4, que fueron los fertilizados con orina se diluía ésta en agua destilada, la cantidad de agua variaba de acuerdo a las necesidades hídricas de la planta, la cual se calculaba por la cantidad de peso que había perdido la maceta.



El volumen se medía con una probeta y se pasaba a un vaso de precipitados; el riego se hizo en pequeños círculos alrededor de la planta, de tal manera que se cubriera toda el área superficial de la maceta, y tomando especial cuidado de que no cayera sobre la planta. Esta fertilización comenzó el día del trasplante hasta terminar la dosis para cada tratamiento; Dosis 1 de orina = 634.5 mg N.

Las dosis de orina se aplicaban 2 veces por semana, con un total de 15 aplicaciones para de esta forma completar la concentración específica de cada tratamiento como lo describe la tabla 2.5.

**Tabla 2.5 Cantidad de N aplicado (acumulado) en las dosis de orina 1**

No. de aplicación	Dosis orina acumulada mg N / aplicación
1	42.3
2	84.6
3	126.9
4	169.2
5	211.5
6	253.8
7	296.1
8	338.4
9	380.7
10	423
11	465.3
15	507.6
13	549.9
14	592.2
<b>15</b>	<b>634.5</b>

### 2.3.3 Diseño de experimentos

Un experimento diseñado es una prueba o serie de pruebas en las cuales se inducen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida. Los métodos de diseño experimental tienen un cometido importante en el desarrollo y depuración de procesos para mejorar el rendimiento. En muchos casos, el objetivo puede ser desarrollar un proceso consistente o robusto, esto es un proceso afectado mínimamente por fuentes o variables externas.

En este trabajo se utilizó el diseño de experimentos con un solo factor o unifactorial, es decir experimentar con un solo tipo de suelo, y comparar la respuesta que tienen las plantas de jitomate al ser fertilizadas con solo agua destilada (T1), una dosis de orina (T2), una dosis de orina más una dosis de heces



(T3) y una dosis de orina más una dosis doble de heces (T4). Cada tratamiento incluía cuatro réplicas. La variable de respuesta seleccionada para el análisis unifactorial es la producción de jitomate. En este modelo los efectos del tratamiento se definen como desviaciones con respecto a la media general.

El procedimiento de prueba se resume en la tabla 2.6, denominada tabla de análisis de varianza.

**Tabla 2.6 Tabla de análisis de varianza para el modelo de efectos fijos unifactorial**

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media de Cuadrados	$F_0$
Entre tratamientos	$SS_{\text{Tratamientos}}$	$a-1$	$MS_{\text{Tratamientos}}$	$F_0 = \frac{MS_{\text{Tratamientos}}}{MS_E}$
Error (dentro de tratamientos)	$SS_E$	$N-a$	$MS_E$	
Total	$SS_T$	$N-1$		

### 2.3.4 Condiciones ambientales

Dentro de los factores que determinan el ciclo de cultivo del jitomate se encuentran las condiciones climáticas; las condiciones óptimas para el cultivo de jitomate se encuentran descritas en la tabla 2.7

**Tabla 2.7 Condiciones climáticas requeridas para el jitomate**

Variable climática	Condiciones requeridas
Temperatura	Mínima 8 -12 °C Óptima 21 – 27 °C Máxima 32 – 36 °C
Humedad relativa	La humedad relativa ideal para el desarrollo del cultivo de tomate debe estar entre 60 y 80% para su óptimo crecimiento y fertilidad.
Intensidad luminosa	Niveles altos de radiación solar diaria (alrededor de 0.85 Mega Joules por metro cuadrado) son los mínimos para la floración y un buen desarrollo de la planta.

#### 2.3.4.1 Invernadero

El trabajo se desarrolló en un invernadero experimental acondicionado en el Instituto de Ingeniería (I.I) UNAM como se describió en el inciso 2.1.1 y se observa en la figura 2.4. El invernadero se acondicionó con el fin de desarrollar la experimentación con el cultivo de jitomate en las mejores condiciones; contaba con las siguientes características: medidas 8.70 de largo, 2.50 m de alto, paredes

de lámina galvanizada con techo de policarbonato, sistema de enfriamiento y calentamiento automático mediante dos extractores y dos calentadores.



**Figura 2.4 Vista exterior del invernadero experimental**

Se realizó la ventilación con dos extractores. De esta forma el aire del invernadero se renovaba rápidamente. Para controlar el proceso de ventilación, se utilizó un temporizador, programado para operar de las 10 am hasta las 5 pm.

#### **2.3.4.2 Monitoreo de parámetros ambientales**

##### **a) Humedad**

La humedad es uno de los factores climáticos que determinan el crecimiento y buen desarrollo de las plantas, por lo que durante todo el desarrollo experimental del cultivo se humedeció diariamente el suelo del invernadero con agua. Para lograr una mejor retención de la humedad se contaba con varias jergas distribuidas a lo largo y ancho del suelo del invernadero.

##### **b) Temperatura**

La temperatura del invernadero se regulaba por medio de extracción de aire para mantener ventilado el espacio. En época de invierno, debido a que la temperatura disminuyó considerablemente, se colocaron 2 calentadores marca Honeywell de 1500 watts cada uno, para que durante la noche se mantuviera la temperatura. Para que los calentadores operaran de manera automática se instaló una fotocelda a un relevador.



Con la finalidad de saber a qué condiciones ambientales se sometió el cultivo diariamente se realizó un registro dentro y fuera del invernadero del % de humedad relativa, intensidad luminosa y la temperatura máxima y mínima dentro del invernadero, hasta la cosecha.

Debido a la variabilidad de la temperatura dentro del invernadero, la orina se almacenó en un cuarto aislado. Durante el periodo de riego se monitoreó la temperatura máxima y mínima de almacenamiento de la orina, con un termómetro de máximas y mínimas. En la siguiente tabla (2.8) se muestran los promedios de estas temperaturas por mes.

**Tabla 2.8: Temperaturas promedio mensual del sitio donde se almacenó la orina, durante el periodo de fertilización**

MES	T Min (°C)	T Max (°C)
Diciembre	5	22
Enero	7	22
Febrero	10	24

### **2.3.5 Crecimiento y riego de plantas**

El agua destilada se utilizó para diluir la orina y recuperar la humedad pérdida por cada maceta, inclusive después de terminada la fertilización hasta la cosecha conforme a las condiciones climáticas y de acuerdo a la cantidad de agua perdida por cada tratamiento.

Las variables que se evaluaron durante el proceso de cultivo fueron: altura del tallo y número de hojas, a los días de cultivo y posterior a la cosecha; se determinaron los pesos secos de las hojas y tallo, el peso húmedo y seco de la producción de jitomate y peso seco de la raíz. Dichas variables se detallan a continuación.

#### **2.3.5.1 Altura de la planta**

A partir del día de trasplante se midió la altura del tallo principal de la planta con un flexómetro, desde la base del tallo hasta la parte más alta del mismo, los datos se registraron en centímetros. Ésta medición se realizó cada siete días hasta la cosecha para determinar la tasa de crecimiento de las plantas.

#### **2.3.5.2 Cantidad de hojas**

Se cuantificó el número de hojas de cada unidad experimental de jitomate desde el trasplante hasta la cosecha. El registro se realizó semanalmente como una

forma cualitativa del crecimiento. Los datos fueron expresados como número de hojas por planta.

### **2.3.5.3 Días de cultivo**

De igual forma, desde el día de trasplante hasta la cosecha de cada maceta, se realizó el conteo de los días de cultivo. Los datos fueron expresados en número de días a la cosecha, el total de días de cultivo fué de 139.

### **2.3.5.4 Peso seco de tallos y hojas**

La planta ya sin frutos se cortó al ras del suelo con una tijera de podar, cortando las ramas con hojas, como el tallo en pequeños pedazos de aprox. 2-3 cm de largo. Se metió a la estufa toda la biomasa por un tiempo de 48 horas a  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ . Posteriormente se trituró a polvo en un molino eléctrico comercial y se almacenó para la caracterización, la cual se describe en el capítulo 3, inciso 3.4

### **2.3.5.5 Peso y medidas del jitomate**

Se registró el peso neto de los frutos de cada maceta en el momento de su cosecha, el peso se registró en Kg de jitomate / planta. También se midió lo largo y ancho de cada jitomate con un vernier, figura 2.5 (a), y el valor promedio de todos los frutos por maceta se expresó en centímetros. Posteriormente el fruto fue cortado en pequeños gajos como se muestra en la figura 2.5 (b), y puestos a secar en la estufa a  $55^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  por 48 horas. Se determinó el peso de la muestra seca y se trituró a polvo en un molino eléctrico comercial, se almacenó para la caracterización, descrita en el capítulo 3, inciso 3.5.



(a)

(b)

**Figura 2.5 Procedimiento de tratamiento del fruto a) medición b) secado en estufa**

### **2.3.5.6 Peso de raíz**

Un día posterior a la cosecha se sacó el suelo de cada maceta separando la raíz. Éste procedimiento se describe más adelante usando todas las medidas preventivas necesarias para evitar contacto con el material fecal contenido en las unidades experimentales. Una vez separada, se secó la raíz a  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  por 24 horas en estufa y también se trituró a polvo con un molino eléctrico para su caracterización. El contenido de raíz por maceta se expresa en gramos.

### **2.3.6 Seguimiento del cultivo**

#### **2.3.6.1 Soporte y guiado de las plantas**

Las plantas en etapa de desarrollo y maduración se soportaron con mecates delgados colocados a diferentes alturas a lo largo de las mesas, amarrados a soportes fijos en cada una de las esquinas como se muestran en la figura 2.6, con la finalidad de que las plantas no se vencieran o rompieran por el peso cuando entraran en su etapa reproductiva.



**Figura 2.6 Soporte de las plantas en etapa de desarrollo**

#### **2.3.6.2 Polinización**

A partir del momento en que empezó la floración en las plantas (figura 2.7), estas fueron polinizadas manualmente con un pincel suave diariamente por las mañanas (entre las 10 am y las 11 am). La técnica utilizada consistía en dar un masaje suave hacia arriba y hacia abajo en el pistilo de cada flor.



**Figura 2.7: Floración de las plantas**

### **2.3.6.3 Control de plaga**

Al principio del cultivo no se había previsto un control de plagas, pero conforme, se desarrollo el cultivo se observó la presencia de mosca blanca (Aleyrodidae), lo que constituyó un grave riesgo para el cultivo y la experimentación en general. Con base en la experiencia del cultivo anterior, se contemplaron y aplicaron dos métodos para contrarrestar el incremento de la población adulta. Uno fue implementar una serie de placas color amarillo con aceite de linaza, las cuales se colocaron alrededor de la planta. Por otro lado, se utilizó un insecticida permitido dentro de la agricultura orgánica según la “Línea Guía Inputs” tal como Bio-Bich, en dosis de 5 g / L de agua, y rociándolo con una bomba para fumigar una vez por semana. En la figura 2.8 (a) se observa la planta de jitomate, después de ser fumigada con el insecticida orgánico; (b) se observa la distribución de las placas dentro del invernadero.

### **2.3.6.4 Cosecha**

La recolección de frutos del jitomate comenzó a partir del día 154 y finalizó el día 178 de cultivo (después del trasplante de la plántula). Para lo cual se desprendió el jitomate con mucho cuidado, girando lentamente y teniendo precaución de no maltratar el fruto (figura 2.9). La cosecha se realizaba por maceta dependiendo de la cantidad de frutos maduros. Se embolsaron y trasladaron al laboratorio para procesarlos y evaluar las variables antes mencionadas.



(a)



(b)

**Figura 2.8 Cuidados fitosanitarios del cultivo a) planta fumigada con insecticida orgánico b) distribución de placas**



**Figura 2.9 Cosecha de jitomate**

### **2.3.6.5 Poscosecha**

Una vez cortado el fruto de cada maceta se procedió a cortar el tallo y hojas para su secado. El suelo que quedó en la maceta se deja secar por varios días para poder realizar la extracción de la raíz.

#### **a) Extracción de raíz**

La maceta que contiene suelo con poca humedad se esparció en una tina de plástico. Con mucho cuidado se fue sacando la raíz, desmoronando la tierra de

alrededor; teniendo cuidado de no romperla, sobre todo la raíz principal como se muestra en la figura 2.10 (a).



(a)

(b)

**Figura 2.10 Preparación del suelo después del cultivo a) extracción de la raíz y b) cuarteo de suelo**

### **b) Procesamiento del suelo**

El suelo ya sin raíz se maceró con un pistilo de porcelana para que no quedaran terrones grandes; posteriormente se dejó secar a la sombra. Seco el material, nuevamente se maceró para obtener una muestra homogénea. Se seleccionó 1 Kg de muestra de suelo para caracterización siguiendo el procedimiento de cuarteo descrito en la NMX-AA-015-1985, figura 2.10 (b), que fue tamizado por malla con apertura de trama de 2 mm. Los parámetros seleccionados para la caracterización del suelo de todos los tratamientos después del cultivo son los mismos descritos en la tabla 2.1.

### **2.3.7 Prueba de lixiviación**

Adicional a la caracterización del suelo después de cultivar, se diseñó una prueba para determinar los iones que se pudieran perderse por lixiviación. La prueba consistió en agregar a una botella de plástico de 400 mL, 70 g de suelo seco y procesado, más 350 mL de agua destilada. Las botellas se colocaron en agitación en un Agitador servoconductor por 10 min, y se dejaron reposar una noche. Al día siguiente se retiró el sobrenadante con la ayuda de una manguera y se filtraron las muestras.

Los parámetros seleccionados a determinar en las muestras del lixiviado del suelo fueron los siguientes:  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ .

# 3

## RESULTADOS

En este capítulo se concentran todos los resultados obtenidos respecto a la caracterización de las muestras y todo lo concerniente al cultivo de jitomate, en base a la metodología descrita en el capítulo 2.

### 3.1 CARACTERIZACIÓN

#### 3.1.1 Suelo

En la tabla 3.1 se concentran los valores promedios  $\pm$  desviación estándar obtenidos para los resultados de la caracterización fisicoquímica del suelo al inicio de la investigación, los cuales se encuentran detallados en el inciso A1, tablas A1.1 a la A1.7 del Anexo A.

Tabla 3.1 Caracterización del suelo

PARÁMETRO	SÍMBOLO	$\bar{X} \pm \sigma$	UNIDAD
Potencial hidrógeno	pH	6.11 $\pm$ 0.05	Adimensional
Conductividad	CE	70.33 $\pm$ 2.29	$\mu\text{S}/\text{cm}$
Potencial Redox	Eh	259.33 $\pm$ 2.82	mV
Humedad	$\theta$	7.15 $\pm$ 1.87	%
Materia volátil	MV	13.68 $\pm$ 0.83	
Materia fija	MF	86.30 $\pm$ 0.99	
Materia Orgánica	MO	1.22 $\pm$ 0.15	
Nitrógeno total	Nt	1037.47 $\pm$ 32.97	mg/ Kg de suelo
Magnesio	Mg <sup>2+</sup>	1123.66 $\pm$ 438	
Calcio	Ca <sup>2+</sup>	78.90 $\pm$ 7.87	
Potasio	K <sup>+</sup>	884.94 $\pm$ 57.79	
Sodio	Na <sup>+</sup>	486 $\pm$ 179.5	
Fosfatos	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	0.48 $\pm$ 0.40	
Nitritos	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	0.18 $\pm$ 0.07	
Nitratos	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	9.3 $\pm$ 2.25	
Capacidad de intercambio catiónico	CIC	25.19 $\pm$ 0.66	Cmol (+) / Kg

El pH del suelo fue de 6.11, valor que, de acuerdo a la clasificación de suelos de la NOM-021-RECNAT-2000, se considera moderadamente ácido; la materia orgánica contenida corresponde al 1.22 %, de acuerdo a la clasificación de dicha norma corresponde a un bajo contenido de MO.



El nitrógeno total fue de 1.04 g Nt / Kg de suelo, este valor referido a la norma antes mencionada se interpreta como muy bajo.

En cuanto a los otros macronutrientes presentes en el suelo, solo el  $Mg^{2+}$  se encuentra en mayor proporción (1123.66 mg / Kg de suelo), el resto se encuentra en cantidades menores, debido a que el suelo es pobre en el contenido de estos nutrientes.

### 3.1.2 Orina

En la tabla 3.2 se presentan los promedios de los resultados obtenidos para la caracterización de la orina en base a los parámetros seleccionados en el inciso 2.2.2. Los resultados se encuentran en el inciso A2, tablas A2.1 a la A2.5 del Anexo A.

**Tabla 3.2 Caracterización de la orina**

PARÁMETRO	SÍMBOLO	$\bar{X} \pm \sigma$	UNIDAD
Potencial hidrógeno	pH	9.08 $\pm$ 0.06	Adimensional
Conductividad	CE	38.8 $\pm$ 0.05	mS/ cm
Sólidos sedimentables*	SSe	< 0.5	mL/ L
Sólidos totales	ST	12038 $\pm$ 757	mg / L de orina
Sólidos volátiles totales	SVT	2843 $\pm$ 29	
Sólidos suspendidos Totales	SST	197 $\pm$ 35	
Sólidos disueltos totales	SD	11840 $\pm$ 784	
Nitrógeno total	Nt	6091 $\pm$ 71	
Nitrógeno amoniacal	NH <sub>3</sub> -N	5884 $\pm$ 68	
Nitritos	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	2.00 $\pm$ 0.5	
Nitratos	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	79.0 $\pm$ 13	
Fosfatos	PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> -P	242 $\pm$ 2	
Magnesio	Mg <sup>2+</sup>	10 $\pm$ 5.4	
Calcio	Ca <sup>2+</sup>	14.9 $\pm$ 6	
Potasio	K <sup>+</sup>	1561 $\pm$ 35	
Sodio	Na <sup>+</sup>	2620 $\pm$ 70	
Coliformes fecales*	UFC	Ausencia	
Coliformes totales*	UFC	Ausencia	

\* Concha, 2011

En los datos reportados en la tabla 3.2 el pH de la orina es de 9.08, que coincide con los datos reportados para la orina hidrolizada (Vinnerås *et al.*, 2001; Jönsson *et al.*, 2005). El contenido de nitrógeno total fue de 6091mg de Nt / L; y el nitrógeno amoniacal de 5884 mg NH<sub>3</sub>-N / L, lo que indica que el 95.5 % del nitrógeno se encuentra en forma amoniacal, como se mencionó en el capítulo 1, inciso 1.2.3. El amonio es una de las formas principales en que el nitrógeno es absorbido por la planta y el principal nutriente necesario para el crecimiento.

Las concentraciones de los macronutrientes Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup> y K<sup>+</sup> corresponden a 10, 14.9 y 1561 mg / L, respectivamente. Destaca de estos resultados el alto contenido de K<sup>+</sup>, el cual es importante para mejorar el crecimiento y la resistencia de las plantas a enfermedades (Esrey *et al.*, 2001). La concentración de Na<sup>+</sup> es



alta, 2620 mg / L, debido al consumo de cloruro de sodio (NaCl) en la dieta diaria de las personas.

El análisis microbiológico de la orina utilizada en la investigación fue evaluado por Concha, 2012; es importante destacar la ausencia de coliformes fecales y totales, este resultado se puede atribuir al pH alcalino ya que como mencionan Schönning y Stenström, 2004, muchos microorganismos están adaptados a un pH neutro (7) y las condiciones alcalinas tienen un efecto inactivador.

### 3.1.3 Heces

En la tabla 3.3 se resumen los resultados promedio obtenidos para la caracterización fisicoquímica de las heces en base a los parámetros seleccionados. Los resultados para las heces se encuentran desarrollados en el inciso A3, tablas A3.1 a la A3.4 del Anexo A.

**Tabla 3.3 Caracterización de las heces (base seca)**

PARÁMETRO	SÍMBOLO	$\bar{X} \pm \sigma$	UNIDAD
Materia volátil	MV	85.32 $\pm$ 1.16	%
Materia fija	MF	14.67 $\pm$ 1.16	
Nitrógeno total	Nt	45180 $\pm$ 280	mg/ Kg de heces
Nitritos	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	11.87 $\pm$ 3.78	
Nitratos	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	994 $\pm$ 387	
Fosfatos	PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> -P	21 $\pm$ 13	
Magnesio	Mg <sup>2+</sup>	4105 $\pm$ 554	
Calcio	Ca <sup>2+</sup>	1972 $\pm$ 315	
Potasio	K <sup>+</sup>	5650 $\pm$ 1672	
Sodio	Na <sup>+</sup>	1413 $\pm$ 144	

De los resultados obtenidos en la tabla 3.3 es importante mencionar el alto contenido de nitrógeno total en las heces humanas, el cual fue de 45180 mg / Kg; que comparado con los resultados de la bibliografía consultada este valores 2.5 veces mayor (Mnkeni et al., 2006), la variación se atribuye principalmente a la dieta alimenticia, por lo tanto, difiere entre las personas. De acuerdo con Niwagaba, 2009a, el 20 % de nitrógeno fecal es amoníaco, bioquímicamente degradado de las proteínas, péptidos y aminoácidos, el 17 % se encuentra en las bacterias y el resto es nitrógeno orgánico combinado en moléculas como el ácido úrico y enzimas.

Otro aspecto importante es el alto contenido de Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup> y K<sup>+</sup>, los cuales corresponden a concentraciones de 4105, 1972 y 5650 mg / Kg, respectivamente, elementos esenciales para el buen desarrollo de las plantas y los cultivos.



## 3.2 CULTIVO DE JITOMATE

### 3.2.1 Condiciones ambientales durante el cultivo

En la tabla 3.4 se resumen las condiciones ambientales promedio por mes de monitoreo, como se describió en el inciso 2.3.4.2, del capítulo 2; desde el trasplante hasta la cosecha del jitomate. Todas las variables se encuentran dentro de la tasa necesaria para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Como se puede observar, la temperatura del invernadero se encuentra dentro de la requerida para el crecimiento de las plantas; el porcentaje de humedad relativa promedio dentro del invernadero fue 20 % más alta que la del exterior, pero se encuentra por debajo del promedio óptimo para el crecimiento del jitomate (tabla 2.7 capítulo 2) de 60-80 %. La intensidad luminosa exterior promedio, fue 4.5 veces mayor que en el invernadero. Esta variación se debió al cambio de estación (primavera) y al incremento de la temperatura e intensidad luminosa de la temporada.

**Tabla 3.4 Condiciones ambientales dentro del invernadero experimental y el exterior ( $\bar{X} \pm \sigma$ )**

Variable ambiental	Invernadero	Exterior
Temperatura max. (°C)	30 ± 3	22 ± 2
Temperatura mín. (°C)	17 ± 1	7 ± 3
Humedad relativa (%)	54.1 ± 6.5	31.8 ± 3.6
Intensidad luminosa (Lx)	16540 ± 1200	79171 ± 7500

### 3.2.2 Riego

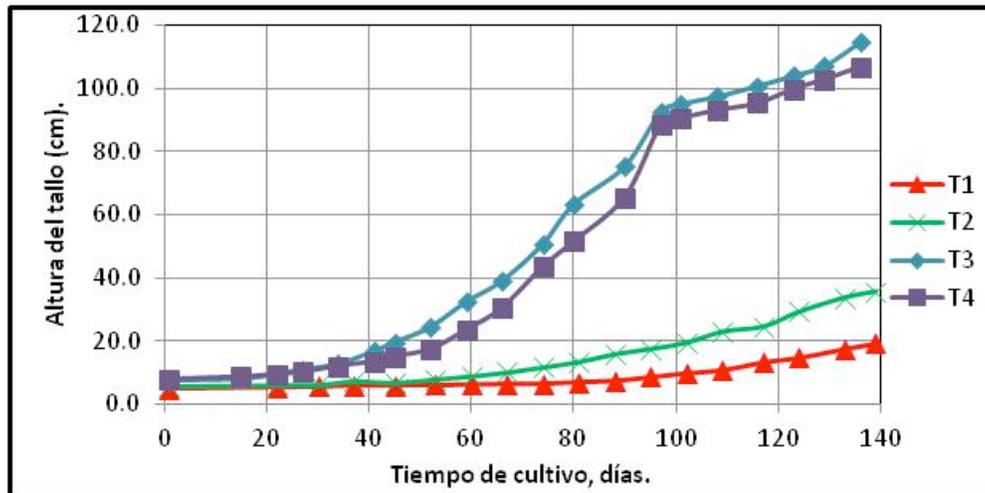
El riego de las plantas fue aplicado conforme a las necesidades hídricas de cada tratamiento. En general, en el caso de T1 y T2, el consumo de agua promedio fue de 12.35 litros por cada maceta; y en el caso de T3 y T4 el consumo de agua promedio por maceta fue de 43.15 litros. Los tratamientos T3 y T4 consumieron 3.5 veces más agua que los otros dos; esto es, debido al crecimiento general que tuvo cada planta donde se aplicaron heces humanas (T3 y T4); como se verá después tuvieron un crecimiento significativamente mayor que las plantas regadas con agua y orina solamente.

### 3.2.3 Altura de la plantas

En la figura 3.1 se muestra la tasa de crecimiento promedio de las plantas para cada tratamiento. Los resultados de esta investigación muestran que desde el día 40 después del trasplante, la tasa de crecimiento de las plantas de los T3 y T4 (dosificados con orina 1+ dosis 1 heces y orina 1 + dosis 2 heces) son significativamente mayores a los T1 y T2 (fertilizados con agua y orina 1). Por otro

lado, a los 70 días de cultivo, la tasa de crecimiento de las plantas fertilizadas con orina (T2) fueron superiores en comparación a la obtenida solo con agua (T1) pero no significativamente. El tratamiento con la mayor altura promedio es el T3 (fertilizado con orina + dosis 1 de heces). Se observa que a partir del día 100 de cultivo el crecimiento de las plantas con respecto al tiempo fue menor.

En la secuencia de fotos de la figura 3.2, se muestra el crecimiento de las plantas al mismo día de cultivo, para los cuatro tratamientos. En las cuales se observa la discrepancia entre el crecimiento de los T1 y T2, en comparación con T3 y T4.



**Figura 3.1 Crecimiento de las plantas (altura), para los cuatro tratamientos**



(a)

(b)

(c)

**Figura 3.2 Crecimiento de la planta de jitomate al día 140 de cultivo para (a) T1, réplica 3; (b) T3, réplica 4; (c) T4, réplica 4**

### 3.2.4 Cantidad de hojas

De acuerdo a lo descrito en el inciso 2.3.5.2 del capítulo 2, se contabilizaron el número de hojas de cada unidad experimental. En la figura 3.3 se muestra el número de hojas promedio para cada tratamiento vs los días de cultivo. Se observa que a partir del día 50 hubo un notable rezago en el incremento de hojas de los T1 y T2 con muy pocas hojas respecto a los T3 y T4 significativamente mayores. Al día de cosecha el tratamiento con mayor número de hojas corresponde al T3. Esta diferencia de igual forma se observa en la figura 3.2.

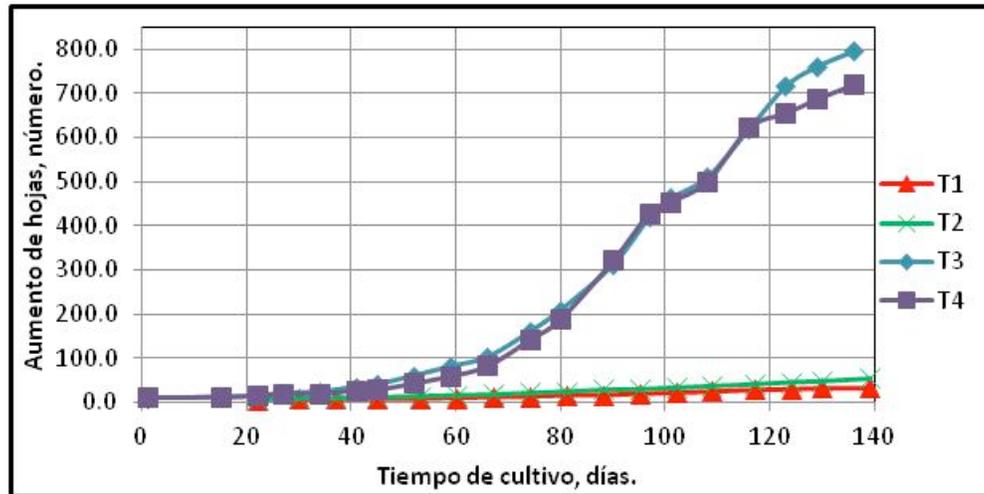


Figura 3.3 Número de hojas acumuladas por día de cultivo, para los cuatro tratamientos

### 3.2.5 Peso seco de tallo, hojas y raíz

En la tabla 3.5 se resumen los pesos en base seca, de acuerdo a los procedimientos descrito en el inciso 2.3.5.4 y 2.3.5.6. Evidentemente los pesos de T3 y T4 tanto de tallos y hojas, como de raíz son mucho mayores a T1 y T2. De acuerdo con Russell *et al.*, 1968, en suelos demasiados compactos (como el que se utilizó para la investigación), se inhibe el desarrollo radicular, por tanto el suelo afecta directamente a la planta. El efecto del suelo sobre el desarrollo del sistema radicular disminuye la cantidad de elementos nutritivos y agua absorbidos, el resultado es deficiencia en el crecimiento de las plantas. Por el contrario, en T3 y T4, donde se aplicaron heces, el sistema radicular tiende a ser más ramificado, favoreciendo la absorción de nutrientes y agua, mejorando la estructura del suelo y la capacidad de amortiguamiento, por lo tanto se obtuvo un mayor crecimiento de la planta. (Jönsson *et al.*, 2004, Russell *et al.*, 1968).



**Tabla 3.5 Pesos secos de tallo, hojas y raíz para todos los tratamientos**

Tratamiento	Peso seco tallo y hojas(g)	Peso seco raíz (g)
T1: Agua	0.625 ± 0.13	0.0373 ± 0.0056
T2: Orina 1	1.725 ± 0.31	0.1969 ± 0.0351
T3: Orina 1 + Heces 1	40.950 ± 10.17	4.6337 ± 0.8723
T4: Orina 1 + Heces 2	44.3 ± 6.67	5.3419 ± 0.8231

### 3.2.6 Producción de jitomate

El valor fertilizante de la orina y las heces humanas ha sido estudiada con anterioridad, pero no se tienen referencias de utilizar ambos residuos en conjunto. En este estudio se estableció claramente, en base al análisis fisicoquímico, que tanto la orina como las heces humanas contienen nutrientes que podrían ser utilizados como fertilizante orgánico para la producción agrícola.

Sin embargo, los resultados muestran una significativa diferencia en cuanto a la producción de jitomate ya que solo los T3 y T4 tuvieron producción de frutos; en cambio, en T1 y T2 regados con agua y solo orina, respectivamente, no hubo producción. En la tabla 3.6 se muestra la producción de jitomate en gramos por maceta, así como la producción total para T3 y T4. El T4 fue con el que se obtuvo mayor producción, aproximadamente 300 g más que T3, figura 3.4.

Una explicación de estos resultados (altura, biomasa y producción de jitomate) es que para los tratamientos T3 y T4 se complementaron mejor los nutrientes contenidos en las heces (N, P,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ); además que la materia orgánica juega un papel importante en el acondicionamiento del suelo, favoreciendo el crecimiento radicular, la aireación y el drenado del agua, lo que en conjunto permitió un buen crecimiento y desarrollo de las plantas. Este resultado también se refleja para el caso específico de la producción de jitomate, donde el rendimiento más alto fue el obtenido por el tratamiento T4 debido al aumento de dosis de las heces y, por lo tanto, de estos elementos en las macetas, en especial  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$  que se encuentran en mayor proporción en las heces. Lo anterior concuerda con lo reportado por Surendra *et al.*, 2009, que describen que el  $\text{Mg}^{2+}$  es el responsable de aumentarle rendimiento en los cultivos.

En el caso específico del tratamiento regado únicamente con orina, los nutrientes aportados por ella no son aprovechados por la planta debido a la estructura compacta del suelo, que impide el crecimiento radicular y de la planta.

Por lo tanto con la investigación se muestra que la excreta dosificada conjuntamente tiene un efecto positivo en la producción de jitomate.

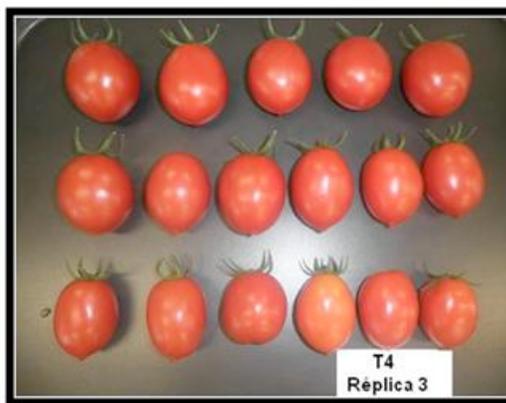
Los pesos secos y las medidas promedio del jitomate de T3 y T4 se resumen en la tabla 3.7. Se observa que el peso seco del jitomate es mayor para T4; en cuanto a las dimensiones, los frutos de T3 son más largos y anchos.

**Tabla 3.6 Producción de jitomate en gramos de fruto húmedo por maceta**

Tratamiento	Peso fresco de la producción de jitomates (g)				Peso total del cultivo (g)
	Réplicas				
	1	2	3	4	
T3: Orina + Heces 1	934.5	542.1	562.1	1033.6	3072.3
T4 Orina + Heces 2	619.1	791.4	975.5	983.4	3369.4



(a)



(b)

**Figura 3.4 Producción de jitomate para (a) T3, réplica 4; (b) T4, réplica 3**

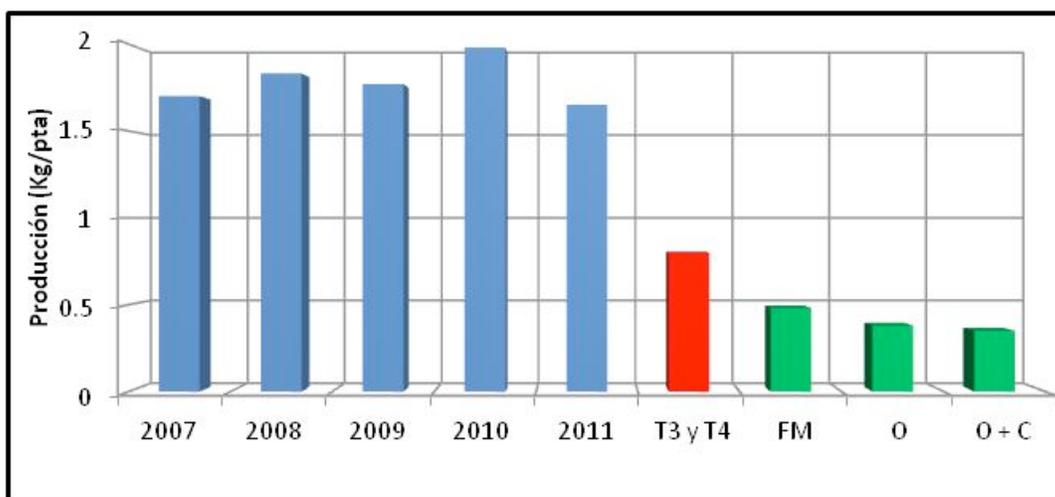
**Tabla 3.7 Peso seco de jitomate en gramos por tratamiento y medidas promedio**

Tratamiento	Peso seco jitomate(g)	Medidas	
		Ancho (cm)	Largo (cm)
T3: Orina 1 + Heces 1	43.1 ± 11.8	4.5 ± 0.80	5.9 ± 0.65
T4: Orina 1 + Heces 2	49.6 ± 4.5	4.2 ± 0.56	5.2 ± 0.71

Otra forma de interpretar estos resultados, es comparar la producción obtenida con la producción nacional y la obtenida por otros autores en sus investigaciones. La producción promedio de las plantas de los T3 y T4 se compararon con la producción anual nacional promedio por planta y con los resultados obtenidos por Surendra *et al.*, 2009, al dosificar orina humana y cenizas de madera en el cultivo de jitomate. En la figura 3.5 se muestra esta comparación, los resultados se encuentran en kilogramo de jitomate por planta; la producción anual nacional (barras azules) se presentan de 2007 hasta el 30 de octubre del 2011 fuente: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), con información de las Delegaciones de la SAGARPA.; la barra roja es el promedio de producción por planta, de los tratamientos T3 y T4 obtenidos en la presente investigación y, por

último, en barras verdes la producción obtenida en la investigación de Surendra *et al.*, 2009 con sus diferentes tratamientos de, fertilizante mineral (FM), orina (O) y orina mas cenizas de madera (O + C).

El resultado obtenido comparado con la producción anual nacional por planta es dos veces menor; debido a que en éste tipo de cultivos se contempla una fertilización balanceada adicionando todos los nutrientes requeridos para el óptimo crecimiento de las plantas y el desarrollo de los frutos, como por ejemplo el fósforo, y en ésta investigación se definieron las dosificaciones en base a las necesidades de nitrógeno únicamente, por lo tanto, se observa una menor eficiencia al comparar ambas producciones. Por otro lado, es importante destacar el mayor rendimiento obtenido por las plantas fertilizadas con excreta humana, dos veces mayor a la producción promedio por planta, obtenida por Surendra *et al.*, 2009, a pesar de que el suelo utilizado en esta investigación contiene características ligeramente ácidas, no recomendadas para este tipo de cultivo, indicando que las heces humanas aplicadas conjuntamente con la orina resultan un buen fertilizante para el cultivo de jitomate; pero antes de realizar cualquier recomendación en la aplicación de excretas en la agricultura es conveniente realizar una investigación microbiológica para evaluar la calidad del fruto y verificar que cumpla con los estándares establecidos.



**Figura 3.5 Comparación de la producción de jitomate**

### **3.3 ANÁLISIS DE SUELO POR TRATAMIENTO DESPUÉS DEL CULTIVO**

#### **3.3.1 Aniones**

Los valores para aniones analizados en el suelo después del cultivo de jitomate se encuentran descritos en el inciso B1 tablas B1.1a la B1.3 del Anexo B.



### **3.3.1.1 Nitritos ( $\text{NO}_2^-$ )**

La concentración de los nitritos en el suelo original (T0) y en los primeros 3 tratamientos es baja, de  $0.18 \pm 0.07$ ,  $0.21 \pm 0.01$ ,  $0.15 \pm 0.05$ ,  $0.12 \pm 0.01$ , mg de  $\text{NO}_2^-$ -N / Kg de suelo, respectivamente; además estos valores se encuentran en el límite de detección del equipo, por lo tanto indica que prácticamente no están presentes. Únicamente para el tratamiento T4 se tiene un valor promedio de  $1.4 \pm 0.8$  mg de  $\text{NO}_2^-$ -N / Kg de suelo, lo que refleja oxidación bacteriana parcial del nitrógeno.

### **3.3.1.2 Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ )**

La concentración promedio de  $\text{NO}_3^-$ -N para el suelo original fue de  $9.3 \pm 0.4$  mg / Kg y la de los tratamientos T1, T2, T3 y T4 correspondientes a  $15.1 \pm 2.1$ ,  $59.8 \pm 1.05$ ,  $9.5 \pm 0.4$  y  $191.9 \pm 60$  mg / Kg. Los nitratos en los T1 y T3 prácticamente se mantienen respecto al suelo inicial. En el caso de T2, incrementa debido al contenido de nitratos en la orina y al escaso crecimiento de las plantas, por lo tanto, los aniones quedaron en el suelo sin ser aprovechados. Para T4, el contenido de nitratos incrementó significativamente, a pesar de que en este tratamiento se obtuvo un buen crecimiento y desarrollo de las plantas; se puede atribuir al exceso del anión presente al aumentar la dosis de heces aplicada.

### **3.3.1.3 Fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ )**

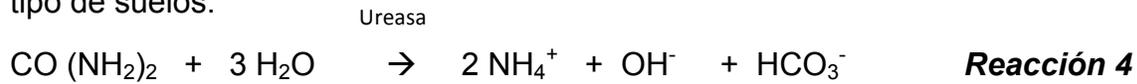
Los resultados de fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ -P) para todos los tratamientos, incluyendo el suelo original (T0 – T4), fueron de  $0.48 \pm 0.04$ ,  $<0.2 \pm 0.0$ ,  $0.52 \pm 0.48$ ,  $<0.2 \pm 0.0$ ,  $1.05 \pm 0.31$  mg / Kg, respectivamente. En el caso de T1, los aniones presentes en el suelo antes de cultivar, fueron aprovechados por las plantas y, por lo tanto, el valor del anión después de cultivar decreció. Algo similar ocurrió en el caso de T3, donde el aporte de fosfatos en las heces y orina es asimilado por las plantas. Para T2, ocurrió un comportamiento parecido al de los nitratos, los fosfatos aportados por la orina no fueron aprovechados del todo por la planta, produciendo un incremento del anión en el suelo. Por último, en T4 existe un exceso del anión debido al incremento de la dosis de heces y la aportación del ión presente en el residuo.

### **3.3.2 pH**

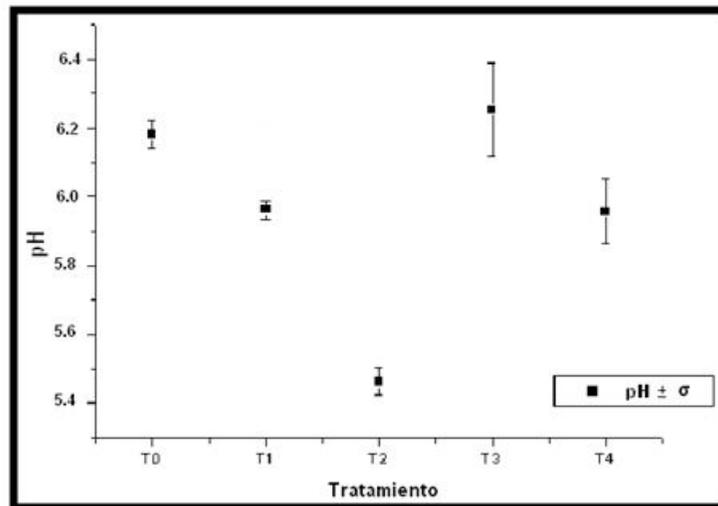
El pH del suelo fue determinado después del cultivo para todos los tratamientos (T1–T4) obteniéndose  $5.96 \pm 0.03$ ,  $5.46 \pm 0.04$ ,  $6.25 \pm 0.14$ ,  $5.95 \pm 0.1$  respectivamente (estos valores se encuentran en el inciso B2, tabla B2.1 del Anexo B), incluyendo el suelo antes de cultivar (T0) de  $6.18 \pm .04$  como se muestra en la figura 3.6. La orina tuvo un efecto acidificante en el suelo, aunque este efecto fue más destacado para el T2. Este resultado se debe a la hidrólisis de la urea en la orina en presencia de ureasa, la urea es rápidamente degradada en amonio, con la posterior nitrificación de éste por las bacterias del suelo, lo que resulta en la producción de iones hidrógeno, reacción 1 y 2 (Surendra et al., 2010, 2009; Mnkeni et al., 2006 Jhönson et al., 2004). El uso continuo de orina humana



sin una fuente adicional de  $\text{Ca}^{2+}$  puede empeorar el problema de acidez en este tipo de suelos.



Sin embargo, Mnkeni et al., 2006 mencionan que la dosificación de heces en suelos ácidos produce un efecto de encalado, debido al alto contenido de  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ . Este comportamiento se observa en T3 donde el pH tiene un ligero incremento con respecto al suelo original; este comportamiento no se refleja en T4, donde se incrementó la dosis de heces humanas y, por el contrario, se obtuvo una ligera acidificación del suelo; en este caso una posible explicación es que debido al exceso de materia orgánica que contiene este tratamiento, exista formación de ácidos ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) como consecuencia de la descomposición de la materia orgánica que no se está aprovechando por la planta, de acuerdo con Bohn et al., 1993.



**Figura 3.6 pH promedio del suelo inicial y para cada tratamiento después de cultivar ± desviación estándar**

### 3.3.3 Conductividad eléctrica

Los resultados de la conductividad del T0 al T4 fueron:  $70.6 \pm 2$ ,  $80 \pm 12$ ,  $270 \pm 14$ ,  $106 \pm 44$  y  $639 \pm 128$  en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , respectivamente, los cuales se encuentran desarrollados en el inciso B2 tabla B2.1 del Anexo B. Al aplicar la orina y las heces, la conductividad eléctrica tuvo efectos opuestos al pH ya que aumentó respecto al suelo inicial en T2, T3 y T4; en el caso de T1, regado solo con agua se mantiene. Esto se debe a que en la orina existen una gran cantidad de sales disueltas y al disociarse generan iones (positivos y negativos) que modifican la conductividad de los suelos. Algo semejante ocurre en los tratamientos con heces, que existe la presencia de estos iones que al estar en contacto con la solución del suelo se



disocian y pueden estar disponibles para las plantas y ser aprovechadas, o bien si existe un excedente se quedan en el suelo.

### 3.3.4 Materia orgánica

Un parámetro fundamental y decisivo en el desarrollo del cultivo es la materia orgánica. En la tabla 3.8 se muestran los resultados obtenidos para éste parámetro (los valores se encuentran en la tabla B3.1, del Anexo B) y su interpretación según la NOM-021-RECNAT-2000.

El porcentaje de materia orgánica aumentó considerablemente para T3 y T4, donde se aplicó heces humanas. Dentro de los beneficios de la MO en el suelo se encuentran: facilitar la absorción de los cationes por el complejo arcilloso- húmico, el cual regula el intercambio catiónico, y de él dependen la cantidad de cationes que son retenidos por el suelo ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) y puestos a disposición de las plantas; de acuerdo con Russell *et al.*, 1968; también existe aportación de nutrientes, tanto directamente, por efecto de su mineralización, como debido a la acción de los microorganismos y la acción de la retención de cationes. Además, la MO produce un efecto sobre la estructura del suelo, lo que ejerce acciones positivas respecto a la porosidad y con ella a la circulación de aire y del agua, a la penetración radicular, etc. El conjunto de todos estos efectos influyen, en resumen, en el mejor crecimiento y la producción de los tratamientos dosificados con heces (T3 y T4), y el encarecimiento en el crecimiento y la falta de producción de T1 y T2 (regados con agua y orina) en el suelo ácido. Hay que resaltar la importancia que tiene la aplicación de materia orgánica en suelos agrícolas para el beneficio de los cultivos.

**Tabla 3.8 Porcentaje de materia orgánica (MO) por tratamiento y su interpretación (según la NOM-021-RECNAT-200)**

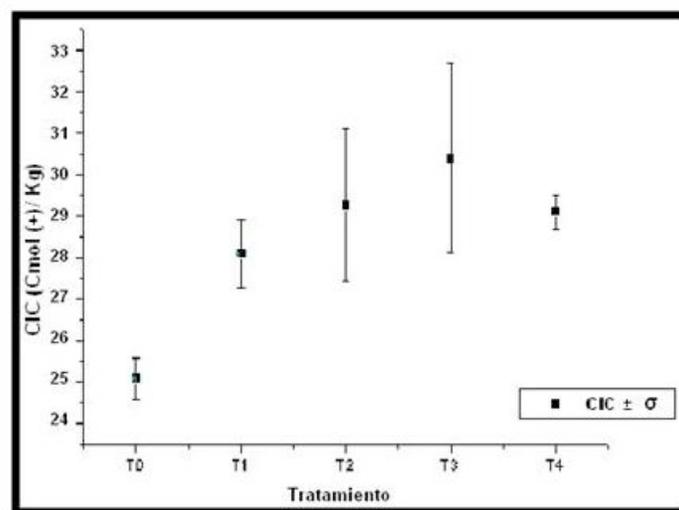
Tratamiento	Materia orgánica (%)	Interpretación de resultados
T0 : Suelo ácido inicial	0.984 ± 0.11	Bajo
T1: Agua	2.11 ± 0.14	Medio
T2: Orina 1	2.19 ± 0.17	Medio
T3: Orina 1 + Heces 1	3.38 ± 0.25	Alto
T4: Orina 1 + Heces 2	5.08 ± 0.59	Alto - Muy alto

### 3.3.5 Capacidad de intercambio catiónico

En términos globales, la CIC de todos los tratamientos respecto al suelo original (T0),  $25.19 \pm 0.66$  Cmol (+) / Kg, incrementó. La orina y las heces modifican positivamente este parámetro, los resultados obtenidos corresponden a  $28.1 \pm 1.37$ ,  $30.4 \pm 3.32$ ,  $31 \pm 2.55$ ,  $28.3 \pm 0.87$  Cmol (+) / Kg, para los tratamientos T1 a T4, respectivamente, los cuales están representados en la figura 3.7, éstos los valores se encuentran en la tabla B4.1, del Anexo B.

A pesar que en la bibliografía mencionan que la materia orgánica mejora la CIC en los suelos, la mayor CIC obtenida fue del T3 y no en el T4 como se esperaba donde se incrementó la dosis de MO aplicada. Este efecto se puede explicar de acuerdo con Porta *et al.*, 2008, donde mencionan que los cambiadores de cationes en la materia orgánica se deben a la ionización de los grupos hidroxilo (-OH) de los fenoles y los grupos carboxílicos (-COOH) de los ácidos orgánicos, cuya disociación dependen fuertemente del pH. Por tanto, como se observó en la figura 3.6, el pH de T3 en relación con el de T4 es mayor, confirmando esta dependencia del pH en la capacidad de intercambió catiónico en este tipo de suelo.

Sin embargo, las diferencias de la capacidad de intercambio catiónico de los cuatro tratamientos (T1–T4) después del cultivo no son significativamente diferentes.



**Figura 3.7 Valores promedio de la Capacidad de Intercambio Catiónico en Cmól (+) / Kg en el suelo inicial y por tratamiento después de cultivar  $\pm$  desviación estándar**

### 3.3.6 Bases intercambiables ( $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Na}^+$ y $\text{K}^+$ )

En la tabla 3.9 se concentran los resultados obtenidos para bases intercambiables (BI) de todos los tratamientos después de cultivar incluyendo el suelo inicial, la cual se elaboró con los datos promedios de las tablas contenidas en los incisos B5.1 al B5.4 del Anexo B.

Para todos los tratamientos el  $\text{Ca}^{2+}$  predomina dentro de los cationes intercambiables analizados, en los resultados presentados en la tabla 3.9 contribuye entre el 51 y el 57 % de la suma de los cationes intercambiables, seguido del  $\text{Mg}^{2+}$  que contribuye del 37 al 46 %; el  $\text{K}^+$  de 2.5 a 4 % y, por último, el  $\text{Na}^+$  con una contribución del 1 a 2.5 %. Por lo tanto, la distribución de las bases intercambiables corresponde a  $[\text{Ca}^{2+}] > [\text{Mg}^{2+}] > [\text{K}^+] > [\text{Na}^+]$ , la cual coincide con la



distribución de los cationes intercambiables en suelos agrícolas mencionada por Bohn *et al.*, 1993.

Estos resultados son debido a tres factores importantes: el primero es que los iones (catión) divalentes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) son más fuertemente retenidos a la estructura del suelo que los iones monovalentes; un segundo factor que influye en la adsorción selectiva es el radio iónico y el grado de hidratación consecuente del ion, porque los iones de mayor radio iónico ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) se hidratan más y en consecuencia son absorbidos con menor fuerza que los iones de menor radio iónico ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ), que se hidratan menos; un tercer factor es la concentración del ion en la solución del suelo, a mayor concentración de un ion en el medio acuoso de la solución del suelo, mayor cantidad de él será retenida (Nuñez S. J, 2000). El suelo inicial de la investigación es de uso agrícola rico en  $\text{Ca}^{2+}$ , por lo tanto es el catión que más se intercambia.

Con base en los resultados, la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  intercambiable incrementó significativamente en T3 y T4 con respecto al suelo inicial (T0), esto es, debido a que las heces son ricas en este elemento y la MO retiene más fuertemente cationes polivalentes que los cationes metálicos monovalentes (Bohn *et al.*, 1993; Russell *et al.*, 1968).

El  $\text{Mg}^{2+}$  es el segundo catión más intercambiado. El magnesio solo incrementó respecto al suelo inicial en el T4 comparado con la concentración en los demás tratamientos donde el  $\text{Mg}^{2+}$  intercambiable se mantiene. Estos resultados muestran que existe gran concentración de magnesio presente en el suelo, la cual aumenta al dosificarle orina y heces.

Respecto al  $\text{K}^+$  intercambiable, se observa en los resultados de la tabla 3.9 que la concentración en T1-T3 decrece respecto al suelo inicial (T0), lo cual indica una deficiencia de potasio en el suelo por el crecimiento de las plantas, aunque Russell *et al.*, 1968, describen que las plantas sustraen más potasio del suelo durante la época de crecimiento que el que corresponde a la reducción en la cantidad de potasio de intercambio. También Bohn *et al.*, 1993, reportan que ciertos silicatos del suelo retienen o fijan fuertemente el potasio; por lo tanto, el potasio fijado se reintegra a la solución del suelo en forma tan lenta que no satisface las necesidades de los vegetales. Únicamente en el caso de T4 la concentración de  $\text{K}^+$  intercambiable incrementa respecto al suelo inicial, pero no de manera significativa, esto se debe a la concentración de potasio en las heces y al incremento de dosis de aplicación para este tratamiento.

El  $\text{Na}^+$  intercambiable se determinó ya que es de interés químico cuando se presenta en exceso, esto es, cuando el  $\text{Na}^+$  excede del 5 al 15 % de los cationes intercambiables. En los diferentes tratamientos como en el suelo inicial analizados, el sodio se encuentra en concentraciones que no rebasan este límite, por lo que no afecta la disponibilidad de los demás cationes, y se consideran como no salinos.

**Tabla 3. 9 Contenido de bases intercambiables en el suelo (Cmol (+) / Kg), ( $\bar{X} \pm \sigma$ )**

Tratamiento	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>
T0 : Suelo ácido inicial	106.06 ± 3.11	91.54 ± 3.31	8.33 ± 0.15	2.56 ± 0.29
T1: Agua	106.44 ± 5.03	96.05 ± 2.44	5.76 ± 0.06	2.34 ± 0.35
T2: Orina1	109.69 ± 6.52	95.4 ± 4.64	5.95 ± 0.07	2.88 ± 0.47
T3: Orina 1 + Heces 1	123.62 ± 7.12	96.09 ± 3.61	5.41 ± 1.49	5.71 ± 0.06
T4: Orina 1 + Heces 2	161.06 ± 3.24	105.04 ± 4.12	10.66 ± 0.81	7.19 ± 0.45

### 3.3.7 Cationes lixiviables (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup>)

En la tabla 3.10 se muestran los resultados obtenidos a partir de la prueba de lixiviación descrita en el inciso 2.3.7, en base a las tablas generadas de los incisos B6.1 al B6.4 del Anexo B. Es evidente que las cantidades de nutrientes perdidos por lixiviación son despreciables comparados con los cationes intercambiables. Únicamente el Na<sup>+</sup>, logra un valor apenas mayor, debido a su mayor solubilidad.

**Tabla 3.10 Contenido de cationes lixiviables en suelo (Cmol (+) / Kg), ( $\bar{X} \pm \sigma$ )**

Tratamiento	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
T0: Suelo ácido inicial	0.02 ± 0	0.01 ± 0	0.01 ± 0	0.03 ± 0
T1: Agua	0.03 ± 0.01	0.09 ± 0.01	0.06 ± 0.02	0.03 ± 0.001
T2: Orina1	0.1 ± 0.01	0.09 ± 0.01	0.13 ± 0.001	0.06 ± 0.001
T3: Orina 1 + Heces 1	0.09 ± 0.01	0.05 ± 0.01	0.17 ± 0.02	0.02 ± 0.01
T4: Orina 1 + Heces 2	0.3 ± 0.07	0.13 ± 0.03	0.22 ± 0.02	0.11 ± 0.02

## 3.4 ANÁLISIS DE PLANTA Y RAÍZ

### 3.4.1 Contenido de cationes (Ca, Mg, Na y K) en planta

El contenido de cationes en la planta se determinó en base a una digestión ácida del tallo y hojas secas, como se describió en el inciso 2.3.5.4 del capítulo 2. Después de la digestión las muestras se analizaron por absorción atómica, flama aire-acetileno. Los resultados del análisis se resumen en la tabla 3.11, generada a partir de las tablas contenidas en los incisos C1.1 al C1.4 del Anexo C.

La composición de las hojas y tallos dependerá de las características de la especie vegetal estudiada así como de la abundancia de estos elementos en el suelo. Las plantas difieren en su poder para absorber algunos cationes, o por lo menos en su capacidad para transferirlos a sus porciones aéreas (Russell *et al.*, 1968).



De acuerdo con los resultados de la tabla 3.11, las plantas de cada tratamiento difieren en la absorción de los cationes. El contenido de calcio es casi el mismo para T1 y T2, pero incrementa para T3 y T4. El calcio es un componente estructural de la pared celular y, por lo tanto, es vital para la formación de nuevas células. En cambio el contenido de magnesio varía considerablemente para cada tratamiento; T1 corresponde a la concentración más alta de magnesio, seguido de T2, T4 y por último T3. La molécula de clorofila contiene un ion magnesio en el núcleo de su estructura, en consecuencia es vital para la producción de clorofila y realización de funciones fotosintéticas (Thompson *et al.*, 2002). El calcio y el magnesio pueden ser absorbidos fácilmente por las raíces, por el intercambio de cationes en forma de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  (Gliessman, 2002).

En el caso de potasio, las concentraciones determinadas para las plantas de cada tratamiento varían considerablemente. El orden de concentración de potasio es ascendente con los tratamientos, la concentración más alta corresponde al T3, seguido de T4, T2 y, por último, T1; la aplicación de heces humanas en el suelo aumenta considerablemente el contenido de potasio en la planta. El potasio afecta a la mayoría de los procesos metabólicos de la planta. Las plantas obtienen el potasio en forma de catión  $\text{K}^+$ , el cual es incorporado por las raíces de los sitios de asimilación de la matriz del suelo o de forma disuelta, como ion intercambiable (Gliessman, 2002).

El sodio determinado para todos los tratamientos se puede considerar constante; únicamente en T2 existe una diferencia en la concentración, debido al sodio presente en la orina y que no fue absorbido por la planta. Aunque el sodio no es esencial para el buen desarrollo y crecimiento de las plantas, es de interés químico debido a las preferencias de animales herbívoros y personas que las consumen.

Los resultados en el análisis de la planta muestran discrepancia entre los tratamientos, un factor importante que influyó directamente en los resultados es que para los T1 y T2 no se obtuvo producción de jitomate, y las plantas no se desarrollaron en comparación con los tratamientos T3 y T4, por lo tanto la acumulación de los cationes en las hojas y tallos de la planta variaron entre tratamientos.

**Tabla 3.11 Contenido de cationes en planta (Cmol / Kg), ( $\bar{X} \pm \sigma$ )**

Tratamiento	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{Na}^+$
T1: Agua	63.39 $\pm$ 15.14	106.17 $\pm$ 25.26	12.50 $\pm$ 3.07	3.05 $\pm$ 0.35
T2: Orina1	72.08 $\pm$ 6.48	91.50 $\pm$ 12.84	58.74 $\pm$ 6.15	4.67 $\pm$ 0.044
T3: Orina 1 + Heces 1	64.73 $\pm$ 16.14	56.66 $\pm$ 9.86	92.76 $\pm$ 14.49	3.37 $\pm$ 0.54
T4: Orina 1 + Heces 2	96.65 $\pm$ 8.71	72.54 $\pm$ 6.35	81.49 $\pm$ 8.79	3.84 $\pm$ 0.49



### 3.4.2 Contenido de cationes (Ca, Mg, Na y K) en raíz

De igual forma para la determinación de los cationes en la raíz se llevo a cabo el proceso descrito en el inciso 2.3.5.6, seguida de una digestión ácida, las muestras se analizaron por absorción atómica flama aire-acetileno. La tabla 3.12 resume los valores obtenidos para cada elemento determinado, los cuales fueron definidos a partir de los incisos C2.1 al C2.4 del Anexo C.

Las raíces de las plantas ejercen, cuatro funciones diferentes: absorber elementos nutritivos y agua del suelo; trasportar unos y otra desde el área donde la absorción tiene lugar a las partes aéreas de la planta y sirven para anclar la planta al suelo. Solamente una porción restringida de las raíces toma parte en la absorción de nutrientes. La composición mineral de las raíces depende de la abundancia de éstos en el suelo (Russell *et al.*, 1968). El contenido de cationes en las raíces también difiere entre los tratamientos.

El contenido de potasio en las raíces para T1 y T2 es mucho menor que para los T4 y T5, por lo tanto se confirma nuevamente que la aplicación de heces humanas en el suelo mejora la absorción de éste elemento, tanto en las raíces como en la planta, T4 es el de mayor concentración de potasio en la raíz, lo que era de esperarse debido al incremento en la dosis de heces.

En el caso de los demás cationes analizados la concentración varía de acuerdo al tratamiento; en el caso de calcio y magnesio, el T1 regado con agua tiene la mayor concentración de estos elementos, seguido de T2, por lo que se interpreta que estos nutrientes se quedaron en las raíces, sin ser asimilados y aprovechados por la planta.

**Tabla 3.12 Contenido de cationes en raíz (Cmol/ Kg), ( $\bar{X} \pm \sigma$ )**

Tratamiento	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>
T1: Agua	35.93 ± 20.55	18.23 ± 5.58	10.32 ± 5.64	14.85 ± 1.45
T2: Orina 1	25.06 ± 4.62	17.85 ± 1.95	10.34 ± 5.82	6.51 ± 1.39
T3: Orina 1 + Heces 1	18.89 ± 4.06	6.98 ± 3.15	44.10 ± 9.48	6.54 ± 1.22
T4: Orina 1 + Heces 2	31.63 ± 4.32	13.49 ± 2.96	51.90 ± 19.41	9.44 ± 2.16

## 3.5 ANÁLISIS DE JITOMATE

### 3.5.1 Nitrógeno

El contenido de nitrógeno total en el fruto se analizó con la finalidad de determinar si existía diferencia entre el valor de nitrógeno asimilada por cada tratamiento. Como se describió, únicamente en T3 y T4 se obtuvo producción de jitomate. En la tabla 3.13 se muestra el contenido de nitrógeno para cada uno de éstos tratamientos (los datos se encuentran en la tabla C4.1 del Anexo C); la cantidad de nitrógeno varía de 3.2 a 2.8 %; y es mayor en T4, lo cual era de esperarse ya



que corresponde al tratamiento con mayor dosificación de nitrógeno (orina y doble dosis de heces humanas).

**Tabla 3.13 Contenido de nitrógeno total (Nt) en el fruto**

Tratamiento	% Nt
T3: Orina 1 + Heces 1	2.8 ± 0.33
T4: Orina1 + Heces 2	3.23 ± 0.39

### 3.5.2 Contenido de cationes (Ca, Mg, Na y K) en jitomate

En la tabla 3.14 se resumen los niveles de concentración de cationes determinados en el jitomate, desarrollados a partir de las tablas de los incisos C3.1 al C3.4 del Anexo C. Éstos muestran que el jitomate es rico en potasio, siendo T4 el que tiene mayor concentración, lo que concuerda con Russell *et al.*, 1968, que describen, que los frutos son relativamente ricos en potasio y pobres en calcio, a causa de que la planta contiene en su tejido reservas móviles mucho mayores de potasio que de calcio, pues mucho del calcio que existe en la planta es relativamente inmóvil. El contenido de los demás cationes en el fruto se mantiene igual para los dos tratamientos. Con estos resultados se verifica el hecho de que en los jitomates se mantienen las cantidades de Ca, Mg, K y Na absorbidos.

**Tabla 3.14 Contenido de cationes (Ca, Mg, Na y K) en jitomate (Cmol/ Kg), ( $\bar{X} \pm \sigma$ )**

Tratamiento	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>
T3: Orina 1 + Heces 1	1.21 ± 0.07	7.18 ± 1.5	111.95 ± 23.34	1.87 ± 0.35
T4: Orina 1 + Heces 2	1.64 ± 0.41	7.64 ± 0.61	133.98 ± 31.04	1.93 ± 0.32

Para realizar un análisis más detallado de los cationes que son absorbidos por toda las partes de la planta (tallo, hojas, raíz y fruto), en la tabla 3.15 se resume la distribución porcentual de cada catión, en las diferentes partes analizadas.

Para los tratamientos donde no se obtuvo producción de jitomate (T1 y T2), los cationes (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> y Na<sup>+</sup>) se acumulan en mayor porcentaje en la planta (tallo y hojas) y la fracción restante en la raíz. Las principales diferencias en la acumulación de cationes entre los tratamientos se atribuyen a este hecho.

El calcio se concentra casi en su totalidad en la planta (tallo y hojas), del 95 al 97 por ciento para todos los tratamientos, le sigue la raíz con el 3 al 4 % y, por último, para los tratamientos donde se obtuvo jitomate del contenido es de aproximadamente 1.5 %.



Del total del magnesio se distribuye del 88 al 99 % en la planta, 10 % en los jitomates y por último se encuentra en la raíz con una distribución aproximada de 1.5 %.

El potasio se acumula en la planta en los tratamientos T1 y T2, aproximadamente 96 %, y el resto en la raíz. Para los tratamientos T3 y T4, el 56 % del potasio se encuentra en el jitomate, seguido del 41 % en la planta y por último 3 % en la raíz.

El sodio se distribuye del 77 al 86 % en la planta, y del 23 al 14 % en la raíz, para los tratamientos sin producción de jitomate. Para T3 y T4, aproximadamente el 56 % del sodio se encuentra en la planta, seguido de la jitomate en un 30 % y por último la raíz con un 14 %.

**Tabla 3.15 Distribución porcentual de cationes en el total de la biomasa (planta, raíz y jitomate) para cada tratamiento**

Distribución de Ca, Mg , Na y K en el total de la biomasa				
Tratamiento	%			
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>
<b>T1: Agua</b>				
Planta(tallo y hojas)	96,62	98.89	95,03	77,16
Raíz	3,38	1,11	4,97	22,84
Jitomate*	-	-	-	-
<b>T2: Orina1</b>				
Planta (tallo y hojas)	96.17	97.80	98.07	86.20
Raíz	3,83	2.20	1.93	13.80
Jitomate*	-	-	-	-
<b>T3: Orina1 + Heces 1</b>				
Planta (tallo y hojas)	95.67	88.21	44.19	56.84
Raíz	2.91	1.20	2.37	12.14
Jitomate	1.41	10.59	53.44	31.01
<b>T4: Orina1 + Heces 2</b>				
Planta (tallo y hojas)	95.08	88.87	36.83	56.35
Raíz	3.32	1.82	2.67	15.43
Jitomate	1.60	9.32	60.51	28.21

\* En estos tratamientos no se obtuvo producción de jitomates

### 3.6 ANÁLISIS DE VARIANZA

El análisis de varianza se realizó de acuerdo con lo descrito en el inciso 2.3.3, a partir de los resultados obtenidos en la producción de jitomate. El objetivo de este análisis tenía como prioridad determinar con qué tratamiento se obtenía el mayor rendimiento en cuanto a producción de jitomates. Debido a que solo en dos de los tratamientos se obtuvo producción, se decidieron analizar otras variables para verificar la influencia que ejercía cada uno de ellas dentro de los tratamientos,



estas variables son: peso en base seca de raíz y planta (tallo y hojas), alturas de las plantas y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo después de cultivar. El análisis de varianza en todos los casos tiene el mismo nivel de confianza. Las tablas de varianza y los cálculos realizados para cada una de las variables se incluyen en el Anexo D, incisos D1 al D5. En la tabla 3.15, se describe el modelo estadístico para la variable de producción de jitomate en base seca.

**Tabla 3.15 Análisis de varianza para el modelo unifactorial de producción de jitomate en base seca**

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media de Cuadrados	F <sub>0</sub> calculada	F <sub>0</sub> 0-01, 3,12	Conclusión
Entre tratamientos	8681.77	3	2893.93	54.15	5.95	Se rechaza
Error (dentro de tratamientos)	641.36	12	53.45			
<b>Total</b>	9323.14	15				

Con el análisis de varianza unifactorial, de acuerdo con lo descrito por Montgomery, 1991, para la variable de producción de jitomate en base seca y un nivel de confianza del 99 % se rechaza la hipótesis H<sub>0</sub>, ya que la F<sub>0</sub> resultante de los cálculos estadísticos es mucho mayor que la de tablas: F<sub>0.01, 3,12</sub> = 5.94. Se concluye que la media de los tratamientos (2893.93) es mucho mayor que la media de cuadrados dentro de tratamientos (53.45); por lo tanto, la dosificación de heces afecta significativamente la producción de jitomate en cada uno de los tratamientos.

**Tabla 3.16 Resultados del análisis de varianza para el modelo unifactorial de las diferentes variables seleccionadas**

Variable	F <sub>0</sub> Calculada	F <sub>0</sub> 0-01, 3,12	Conclusión
Planta base seca	46.58	5.95	Se rechaza
Raíz base seca	66.65	5.95	Se rechaza
Altura de planta	97.19	5.95	Se rechaza
CIC	1.36	5.95	Se acepta

Para las demás variables se realizó el mismo procedimiento y se resumen los resultados en la tabla 3.16. Para las tres primeras variables el resultado es igual que para la producción de jitomate en base seca; debido a que al comparar las F<sub>0</sub>, se observa que la calculada es mayor que la de tablas, para el nivel de confianza de 99 %, por lo tanto el efecto de los tratamientos, es significativo con respecto a la media general. En el análisis de varianza para los resultados de capacidad de intercambio catiónico, se obtuvo una F<sub>0</sub> = 1.36 que es menor que la F<sub>0.01, 3,12</sub> = 5.94, por lo que la H<sub>0</sub> se acepta y se concluye que las medias de

tratamientos no difieren; en otras palabras, la dosificación de orina y heces humanas no afecta significativamente el valor de la CIC en el suelo.

### 3.7 BALANCE DE MASA

El balance de masa es una expresión algebraica para representar la conservación de la materia y llevar a cabo cálculos indirectos de la masa de sustancias que no es posible determinar analíticamente. Por ejemplo, es el caso de nutrientes como nitrógeno, el cual bajo ciertas circunstancias (presión, temperatura y reacciones) es posible que se desorba del suelo como un compuesto gaseoso difícil de cuantificar. El balance se refiere a la diferencia entre la cantidad de nutrientes que entran y que salen de un sistema definido como el de suelo-planta.

Esta definición permite estimar balances nutricionales de una planta (o un lote agrícola) a partir de los nutrientes que egresan del suelo en los frutos y forrajes cosechados, y en los residuos de cultivos que se acumulan en el suelo.

Los ingresos de nutrientes al suelo para las plantas de jitomate de esta investigación, están constituidos por los aportados o dosificados en la orina y heces e incluyendo el contenido de nutrientes en el suelo inicial. Los egresos de nutrientes pueden ser estimados a partir de las concentraciones promedio en el fruto cosechado, los tallos y hojas, raíz y los remanentes en el suelo después del cultivo.

Si se decide realizar el balance general de masa, en cada maceta, o por tratamiento, para conocer la asimilación de los nutrientes adicionados (N, Ca, Mg, K), se requiere hacer un esquema, como el que se propone en la figura 3.8 para el caso específico del contenido de nitrógeno total.

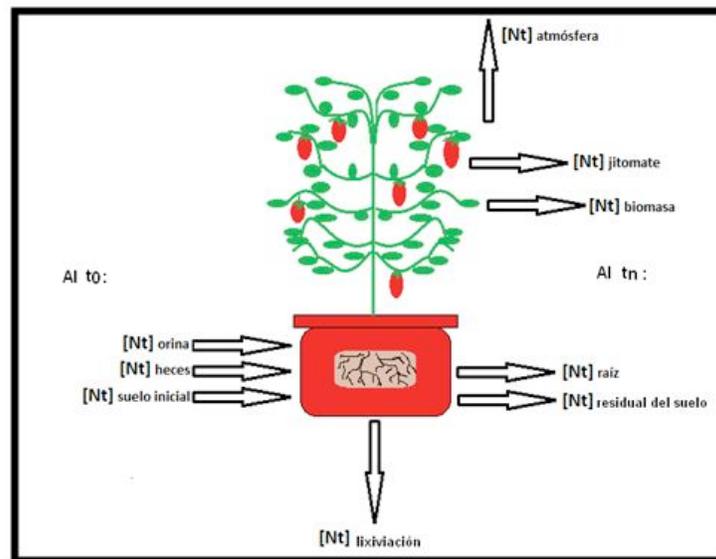


Figura 3.8 Esquema para el balance de masa del nitrógeno total en el cultivo de jitomate



De acuerdo con la figura anterior, el contenido de nitrógeno, para el  $t_0$  (condiciones iniciales), es igual al dosificado en las heces y orina más el contenido inicial de nitrógeno en el suelo; expresión que está descrita en la ecuación (1):

Al  $t_0$ :

$$[Nt] = N_{si} + N_o + N_h \dots \dots \dots \text{Ec. (1)}$$

Donde,

$N_{si}$ , N del suelo inicial

$N_o$ , N agregado por la orina

$N_h$ , N agregado por las heces

Después, a un tiempo de cosecha “n”, el nitrógeno se distribuye en las diferentes partes de la planta, también se consideran las posibles pérdidas por lixiviación en el suelo y, por último, el nitrógeno que no fue asimilado por la planta y se queda de forma residual en el suelo que se representa por la ecuación 2. Para facilitar el análisis se considera que el sistema no fija nitrógeno de la atmósfera:

Al  $t_n$ :

$$[Nt] = N_{rs} + N_j + N_p + N_r + N_{lix} + N_{at} \dots \dots \dots \text{Ec. (2)}$$

Donde,

$N_{rs}$ , N residual del suelo.

$N_j$ , N asimilado por el jitomate.

$N_p$ , N asimilado por la planta (tallo y hojas).

$N_r$ , N asimilado por la raíz.

$N_{lix}$ , N perdido por lixiviación.

$N_{at}$ , N perdido a la atmósfera en forma gaseosa ( $N_2$ ,  $N_2O$ ,  $NH_3$ ).

Con estas dos ecuaciones, se conoce cuál es el nitrógeno total por unidad experimental (maceta) a la cosecha, y de esta forma inferir cuánto nitrógeno se pierde de forma gaseosa, ya que este parámetro es difícil de cuantificar. Por lo tanto, para conocer el nitrógeno emitido a la atmósfera se igualan las ecuaciones (1) y (2), y se despeja  $N_{at}$ , representado por la ecuación (3):

$$N_{at} = N_{si} + N_o + N_h - N_{rs} - N_j - N_p - N_r - N_{lix} \dots \dots \dots \text{Ec.(3)}$$

La lixiviación es la pérdida de nitrógeno (o de cualquier otro nutriente) en la solución del suelo que se drena por gravedad de la maceta, pero generalmente durante la experimentación se evita, por lo tanto, las pérdidas por lixiviación son iguales a cero, y se obtiene la ecuación (4):



$$N_{at} = N_o + N_h + N_{si} - N_{rs} - N_j - N_p - N_r \dots\dots\dots \mathbf{Ec.(4)}$$

Para calcular la concentración de nitrógeno en cada término individual de la ecuación, se deben relacionar las concentraciones de nitrógeno obtenidas experimentalmente con la cantidad de muestra utilizada y el material dosificado u obtenido, tal como se describe en las siguientes ecuaciones:

Para el nitrógeno total inicial del suelo “N<sub>si</sub>” se tiene:

$$N_{si} = [X_{si}] [M_{si}] \dots\dots\dots \mathbf{Ec.(5)}$$

Donde,

X<sub>si</sub>, Concentración de nitrógeno total en el suelo inicial en mg de Nt / Kg de suelo.

M<sub>si</sub>, Cantidad de suelo inicial en cada maceta, en Kg.

Para el nitrógeno total dosificado en la orina “N<sub>o</sub>”:

$$N_o = [X_o] [V_o] \dots\dots\dots \mathbf{Ec.(6)}$$

Donde,

X<sub>o</sub>, Concentración de nitrógeno total en la orina en mg de Nt / L de orina.

V<sub>o</sub>, Volumen total de orina dosificada en L.

En el caso del nitrógeno en las heces “N<sub>h</sub>”:

$$N_h = [X_h] [M_h] \dots\dots\dots \mathbf{Ec.(7)}$$

Donde,

X<sub>h</sub>, Concentración de nitrógeno total en las heces, en mg de Nt / Kg de heces.

M<sub>h</sub>, Cantidad de heces dosificadas por tratamiento, en Kg.

Para el nitrógeno residual del suelo, “N<sub>rs</sub>” se tiene:

$$N_{rs} = [X_{rs}] [M_{rs}] \dots\dots\dots \mathbf{Ec. (8)}$$

Donde,

X<sub>rs</sub>, Concentración de nitrógeno total residual en el suelo después del cultivo, en mg de Nt / Kg de suelo.

M<sub>rs</sub>, Cantidad de suelo final en cada maceta, en Kg.

Por último, para el nitrógeno total contenido en el jitomate, planta (tallo y hojas) y raíz, “N<sub>j</sub>, N<sub>p</sub>, N<sub>r</sub>”, la concentración de nitrógeno obtenida analíticamente, se multiplica por el peso total de cada componente obtenido, en base seca.

$$\Sigma N_n = [X_j] [M_j] + [X_p] [M_p] + [X_r] [M_r] \dots\dots\dots \mathbf{Ec. (9)}$$



Donde,

$\Sigma N_n$ , Es la sumatoria del nitrógeno total contenido en el jitomate, planta y raíz.

$X_j$ , Concentración de nitrógeno total en el jitomate, en mg de Nt / Kg de jitomate.

$M_j$ , Producción de jitomate, por maceta en base seca, Kg.

$X_p$  = Concentración de nitrógeno total en la planta (tallo y hojas), en mg de Nt /Kg de planta.

$M_p$ = Cantidad de planta (tallo y hojas) generada por maceta en base seca, en Kg.

$X_r$ , Concentración de nitrógeno total en la raíz, en mg de Nt /Kg de raíz.

$M_r$ , Cantidad de raíz generada por maceta en base seca, en Kg.

Para obtener una ecuación general del balance de masa por maceta para conocer el nitrógeno perdido a la atmósfera, se sustituyen las ecuación (5) a la (9), en la (4), y se obtiene:

$$N_{at} = [X_{si}] [ M_{si}] + [X_o] [ V_o] + [X_h] [ M_h] - [X_{rs}] [ M_{rs}] - \Sigma N_n \dots \dots \dots \text{Ec. (12)}$$

Partiendo de la ecuación (12) se define el nitrógeno desorbido por cada maceta. Para poder llevar a cabo el cálculo de la ecuación (12), se necesitan conocer todas las concentraciones de nitrógeno para cada variable definida, lo cual no se había contemplado en un inicio de la investigación, por lo que se tienen las incógnitas de las concentraciones de nitrógeno en el suelo residual, planta y raíz. Si se quisiera realizar el balance de masa del nitrógeno, se tendrían que considerar esos análisis.



# 4

## CONCLUSIONES

---

### 4.1 CONCLUSIONES

- La dosificación de la orina con heces humana en el cultivo de jitomate en suelo ácido favorece tanto la producción como las características finales del suelo. Para el caso de los tratamientos donde se dosificó orina y agua únicamente, no se obtuvo producción debido a la estructura muy cerrada del suelo, la cual impidió el crecimiento radicular, y, por lo tanto, también el de las plantas.
- La mayor efectividad agronómica de las heces humanas como fertilizante, en comparación con la orina, se atribuye a su alta aportación de materia orgánica (4 % de MO), la cual fungió un papel decisivo en la estructura del suelo ácido, ejerciendo acciones positivas respecto a la porosidad y con ella a la circulación de aire, agua y a la penetración radicular.
- En lo que respecta al crecimiento de las plantas, talla y peso, con el tratamiento correspondiente a una dosis de orina y la dosis menor de heces se obtuvo un 8 % más que con la doble dosis de heces. En cambio, en lo que respecta a la producción promedio de jitomate, el tratamiento con doble dosis de heces fue con el que se obtuvo mayor rendimiento (3072 g en total); este mayor rendimiento equivale a 300 g más. Duplicar la dosis experimentada de heces mejora la producción y aparentemente no afecta el desempeño de las plantas. Los resultados obtenidos de la producción comparados con la producción nacional en Kg de jitomate por planta, son dos veces menores, debido a que en este tipo de cultivos se realiza una fertilización balanceada; sin embargo, es importante destacar el mayor rendimiento que se obtuvo con estos tratamientos comparados con estudios previos realizados por Surendra *et al.*, 2009.
- Con el análisis de varianza unifactorial, se demuestra que para las variables de interés seleccionadas (producción de jitomate, cantidad de biomasa, altura de la planta y peso de raíz), la dosificación de heces afecta significativamente a cada una de ellas dentro de los tratamientos. Únicamente para el caso de la CIC, el análisis de varianza muestra que no existe una alteración significativa de éste parámetro entre los tratamientos al ser dosificados con orina y heces.



- La CIC del suelo después de cultivar varía relativamente poco dependiendo del tratamiento, la orina y las heces modifican positivamente este parámetro. El mayor incremento se obtuvo con el tratamiento con la dosis menor de heces, de 31 Cmol (+) / Kg, debido a la materia orgánica. Sin embargo, como se mencionó en base al análisis de varianza las diferencias de CIC de los cuatro tratamientos no son significativamente diferentes.
- En cuanto a las bases intercambiables del suelo, existe mayor concentración en los tratamientos con orina y heces, este resultado se atribuye al aporte de MO, lo que favorece el intercambio. Para los cuatro tratamientos se observa el siguiente orden de las bases intercambiadas  $[Ca^{++}] > [Mg^{++}] > [K^+] > [Na^+]$ , el cual coincide con la distribución de bases intercambiables en suelos agrícolas descrita por la bibliografía.
- El pH de los tratamientos con agua y orina, disminuye respecto del suelo inicial, como consecuencia del tiempo de las pruebas, en su caso de la dosis de orina y de la nitrificación por la actividad biológica que se desarrolla durante la etapa de crecimiento de las plantas, pero aumenta con la adición de heces lo que se atribuye al alto contenido de Ca en las mismas, teniendo el potencial de mejorar el crecimiento de los cultivos en suelo ácido.
- En general la conductividad eléctrica del suelo es baja, 70  $\mu S/cm$ , pero incrementa con la dosificación de orina y heces, debido a que los iones adicionados con las excretas se encuentran disponibles en el suelo.
- La concentración de  $NO_3^-$  lixiviables incrementó en el suelo conforme aumentó la dosificación de heces, lo que confirma el proceso de nitrificación que ocurre por la actividad bacteriana durante el cultivo de jitomate.
- Con base al análisis desarrollado, la orina y las heces humanas pueden ser utilizada como fertilizante orgánico para mejorar el rendimiento de los cultivos ya que son capaces de suministrar los nutrientes necesarios para el crecimiento y la producción de jitomate como: nitrógeno, calcio, magnesio, potasio; además de que las heces humanas por su gran aporte de materia orgánica, tiene la capacidad de mejorar la estructura de los suelos ácidos, como el de esta investigación. pudiendo enmendar los suelos agrícolas con esta problemática. Sin embargo, aún queda camino por recorrer, ya que este tipo de investigaciones se encuentra en una etapa experimental.

#### 4.2 RECOMENDACIONES

- Se necesita investigar la inocuidad y calidad de los frutos fertilizados por este método de cultivo antes de realizar cualquier recomendación en la producción agrícola; además de hacer otras investigaciones para entender más claramente la respuesta de los diferentes elementos presentes en las



excretas como el fósforo y su incorporación en plantas alimenticias y en distintos suelos de cultivo.

- Es importante considerar en estudios futuros el valor fertilizante de las heces humanas, así como las características microbiológicas que establece la normatividad para compararla con la calidad de lodos y biosólidos tipo: A, B o C utilizados en la mejora de la productividad del suelo en ciertos sectores de la agricultura. Además, se debe tener presente una educación cívica respecto a su manejo y efectos adversos que puedan tener sobre la salud.
- Considerar nuevas experimentaciones utilizando diferentes concentraciones de heces para encontrar el valor óptimo de crecimiento de las plantas.
- Debido a que la orina contiene grandes cantidades de sodio (2620 mg /L), se recomienda realizar estudios sobre los efectos que puedan causar su aplicación continua sobre el suelo.



# 5

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Åkerhielm H., Richert S.A. (2003). *Anaerobically digested source separated food residues as fertiliser in cereal producción*. Swedish Institute of Agricultural and Environmental Engineerin. Uppsala, Sweden.
- Arreguín C.F., Paz Soldán C.G. (1993). *El panorama del agua en México*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Comisión Nacional del Agua. México.
- Austin L.M. (2006). *Guidelines for the design, operation and maintenance of urine-diversion sanitation systems*. Water Research Commission, Vol. 4. Report No TT 275/06. ISBN 1-77005-456-1.
- Austin L.M., Duncker L.G., Matsebe G.N., Phasha M.C y Cloete T.E. (2005). *Ecological sanitation- literature review*. Water Research Commission. Report No: TT 246/05. ISBN 1-77005-322-0.
- Beal C., Gardner T., Ahmed W., Walton C. y Hamlyn H.D. (2007). *Closing the nutrient loop: a urine-separation and reuse trial in the currumbin ecovillage, QDL*. Department of Natural Resources and Water, Brisbane.
- Bohn H.L., McNeal B.L., O'Connor G.A. (1993). *Química del suelo*. Segunda edición (Primera edición en español), México, D.F. Limusa (ed). 370 p. ISBN 0-471-82217 5.
- Butler J.N., Cogley D.R (1998). *Ionic Equilibrium: solubility and pH calculations*. John Wiley & Sons (ed). New York. 563 p. ISBN-13: 978-0-471-58526-8.
- Chowdhury M.H y Tarekul M.I. (2008). *Study on effect of urine as fertiliser through vegetables production in Bangladesh*. Asia-Pacific Journal of Rural Development. 18(2): 133-142.
- Concha S.S. (2012). *Efecto de la aplicación de orina humana como fertilizante en suelo ácido y neutro en el cultivo de jitomate*. Tesis de Maestría. UNAM, Posgrado de Ingeniería, México D.F.
- Duncker L.G., Matsebe G.N y Moilwa N. (2007). *The social/cultural acceptability of using human excreta (faeces and urine) for food production*



*in rural settlements in South Africa.* Water Research Commission. Report No TT 310/07. ISBN 978-1-77005-592-6.

- Duncker L.G., Matsebe G.N., Austin L.M. (2006). *Use and acceptance of urine-diversion sanitation systems in South Africa.* Water Research Commission. Vol. 2. Report No. 1439/2/06. ISBN 1-77005-454-5.
- Esrey S., Andersson I., Hillers A. y Sawyer R. (2001). *Cerrando el Ciclo – Saneamiento ecológico para la seguridad alimentaria.* Publicaciones sobre Recursos Hídricos No. 18. ISBN 968-5427-0-X.
- Esrey S., Gough J., Rapaport D., Sawyer R., Mayling S., Vargas J. y Winblad U. (1998). *Ecological Sanitation.* SIDA (Agencia Sueca de de Cooperación y Desarrollo Internacional. Estocolmo.
- Esrey S., Winblad U., Gough J., Rapaport D., Sawyer R., Mayling S. y Vargas J. (1999). *Saneamiento Ecológico*, tr. de la 1ª edición en inglés Ecological Sanitation, Asdi, Estocolmo 1998. ISBN 968-6823-49-2.
- Fassbender H.W., Bornemisza E. (1987). *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina.* Primera edición (Quinta reimpresión), San José, Costa Rica. IICA (ed). 423 p. ISBN 92 9039 124 3.
- Fresler F.G., Gudewort A. y Rosso A. (2008). *Análisis de prefactibilidad de Uso de baños Secos en Argentina.* INTI. Ingeniería Ambiental. RUT No. 17-2236.
- Guadarrama R.O., Pichardo N.A., y Morales O.E. (2002). *Urine and compost efficiency applied to lettuce cultivation under greenhouse conditions in Temixco, Morelos, Mexico.* Serie de Publicaciones de EcoSanRes. Universidad del Estado de Morelos.
- Gurung J.B. (1997). *Review of literature on effects of slurry use on crop production.* The Biogas Support Program. Kathmandu, Nepal.
- Guyton A.C; Hall J.E. (1996). *Human physiology and mechanisms of disease.* Sexta edición, New York, USA. Saunders (ed). 747p. ISBN-13: 978-0721632995.
- Guzmán H.S. (2010). *Secado y alternativas de uso de las heces humanas.* Tesis Lic. UNAM, Facultad de Química. México, D.F.
- International symposium on ecological sanitation. (2003). Proceedings of the 2nd international symposium, 7th –11th April 2003. Lübeck, Germany.
- Johansson, M., Jönsson, H., Höglund, C., Richert S.A. y Rodhe, L. (2001) *Urine separation – closing the nutrient cycle.* Stockholm Water Company.



Stockholm, Sweden. Disponible en:  
[http://www.swedenviro.se/gemensamma\\_se/documents/Urinsep\\_eng.pdf](http://www.swedenviro.se/gemensamma_se/documents/Urinsep_eng.pdf)

- Jönsson H., Baky A., Jeppsson U., Hellström D. y Kärrman E. (2005). *Composition of urine, faeces, greywater and biowaste for utilization in the URWARE model*. Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- Jönsson H., Vinneras B., Stintzing R. y Salomon E. (2004). *Lineamientos para el uso de la orina y heces en la producción de cultivos*. Serie de Publicaciones de EcoSanRes. IAE (Instituto Ambiental de Estocolmo), Suecia. ISBN 91 88714 94 2.
- Mnkeni P.N.S., Cisneros B.J., Phasha M.C y Austin L.M. (2006). *Use of human excreta from urine-diversion toilets in food gardens: agronomic and health aspects*. Water Research Commission. Report No 1439/3/06. ISBN 1-77005-455-3.
- Mnkeni, PNS y Austin, LM. (2009). *Fertiliser value of human manure from pilot urine-diversion toilets*. Water S.A., 35 (1): 133-138. ISSN 0378-4738.
- Montgomery C.D. (1991). *Diseño y análisis de experimentos*. Segunda edición. Editorial Iberoamericana S. A de C. V, México. 589 p. ISBN 968-7270-60-8.
- Morgan, P. (2003). *Experiments using urine and humus derived from ecological toilets as a source of nutrients for growing crops*. The 3rd World Water Forum: 16-23. 17th – 21st March 2003. Kyoto, Japan.
- Niwagaba C.B. (2007). *Human excreta treatment technologies-prerequisites, constrains and performance*. Thesis Lic. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala 2007.
- Niwagaba C.B. (2009a). *Treatment Technologies for Human Faeces and Urine*. Thesis Dr. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala 2009.
- Niwagaba C.B., Nalubega M., Vinnerås B., Sundberg C y Jönsson H. (2009b). *Bench-scale composting of source –separated human faeces for sanitation*. Waste Management, 29: 585-589.
- Nuñez S.J. (2000). *Fundamentos de edafología*. Segunda edición (Tercera reimpresión). San José, Costa Rica. EUNED (ed). 189 p. ISBN 9977-64-148-X.



- Porta J., López A.M y Poch R.M. (2008). *Introducción a la edafología: uso y protección del suelo*. Madrid: ediciones Mundi-Prensa. 451p. ISBN: 978-84-8476-342-0.
- PROAGUA - Programa de Agua Potable y Alcantarillado. (2009). *Diferentes modelos de servicio para baños mejorados y análisis de los costos asociados para su operación*. Lima, Perú, Diciembre 2009.
- Raven P.H., Evert R.F., Eichhorns S.E. (1999). *Biología de las plantas*. Cuarta edición. Barcelona, España. Reverté, S.A (ed). 944 p. ISBN 84-291-1843- 8.
- Richert S. A., Jönsson H., Vinnerås B y Salomon E. (2005). *Guidelines for the use of human urine and faeces in crop production*. Waste Management Strategies. Sustainable Organic Waste Management for Environmental Protection and Food Safety: 357-360.
- Richert S.A., Gensch R., Jönsson H., Stenström T.A y Dagerskog L. (2010). *Practical Guidance on the use of urine in crop production*. Serie de Publicaciones de EcoSanRes. IAE (Instituto Ambiental de Estocolmo). ISBN 978-91-86125-21-9.
- Rodhe L., Richert S.A. and Steineck S., (2004). *Ammonia emissions after application of human urine to clay soil for barley growth*. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 68:191-198.
- Russell E., Russell W.E. (1988). *Las condiciones del suelo y el crecimiento de las plantas*. Novena edición (Cuarta edición en español), Madrid, España. Aguilar S.A (ed).1025 p. ISBN 84-7114-400-X.
- Schönning C. y Stenström T.A. (2004). *Lineamientos para el uso seguro de la orina y de las heces en sistemas de saneamiento ecológico*, Serie de Publicaciones de EcoSanRes, IAE (Instituto Ambiental de Estocolmo), Suecia. ISBN 91 88714 93 4.
- Seóanez M.C. (1998). *Ingeniería medioambiental aplicada a la reconversión industrial y a la restauración de paisajes industriales degradados*. Barcelona, España. Ediciones Mundi-Prensa (ed). 460 p. ISBN 84-7114-749-1.
- Surendra K.P., Jarmo K.H., Weisell J. y Heinonen H.T. (2010). *Human urine and wood ash as plant nutrients for red beet (beta vulgaris) cultivation: impacts of yield quiality*. J. Agric. Food Chem., 58(3): 2034-2039.
- Surendra K.P., Jarmo K.H., Weisell J. y Heinonen H.T. (2009). *Stored human urine supplemented with Wood ash as fertilizer in tomato (solanum*



*lycopersicum*) cultivation and its impacts on fruit yield and quality. *J. Agric. Food Chem.*, 57(16): 7612-7617.

- Surendra K.P., Nerg A.M., Sjöblom A., Jarmo K.H y Heinonen H.T. (2007). *Use of human urine fertilizer in cultivation of cabbage (brassica oleracea)-Impacts on chemical, microbial, and flavor quality.* *J. Agric. Food Chem.*, 55(21): 8857-8663.
- Teuscher H., Adler R., Seaton J.P. (1985). *El suelo y su fertilidad.* Novena impresión, México, D.F. Cia Editorial Continental, S.A de C.V (ed). 510 p.
- Vinnerås B. (2001). *Faecal separation and urine diversion for nutrient management of household biodegradable waste and wastewater.* Universidad Sueca de Ciencias Agrícolas de Uppsala. Departamento de Ingeniería Agrícola. ISSN 00283-0086.
- Vinnerås B., Björklund A. y Jönsson H. (2003a). *Thermal composting of faecal matter as treatment and possible disinfection method – laboratory scale and pilot scale studies.* *Bioresource Technology.*, 88(1): 47-54.
- Vinnerås B., Holmqvist A., Bagge E., Albiñ A. y Jönsson H. (2003b). *The potential for disinfection of separated faecal matter by urea and by peracetic acid for hygienic nutrient recycling.* *Bioresource Technology.*, 89(2): 55-161.
- Vinnerås B., Palmquist H., Balmer P. y Jönsson H. (2006). *The characteristics of household wastewater and biodegradable solid waste – A proposal for new Swedish design values.* *Urban Water Journal.*, 3(1): 3-11.
- WHO. (2006). World Health Organization. *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Vol. 4. Excreta and greywater use in agricultura.* UNEP, FAO, ISBN 92-4-154685 9.
- Winblad U. y Simpson H.M. (2004). *Ecological sanitation – revised and enlarged edition.* IAE (Instituto Ambiental de Estocolmo), Suecia. ISBN 91-88714-98-5.
- Worthen E.L., Aldrich S.R. (1980). *Suelos agrícolas su conservación y fertilización.* Quinta edición (Segunda edición español), México, D.F. Unión tipográfica Hispano-Americana (ed). 416 p. ISBN 968-438-463-7.



# ANEXO A

En este anexo se muestran las tablas de resultados de la caracterización del suelo, orina y heces las cuales se resumen en las tablas 3.1, 3.2 y 3.3 respectivamente del capítulo 3.

## A1 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

### A1.1 pH, conductividad eléctrica (CE) y potencial redox (Eh), en el suelo

Para determinar cada parámetro, se realizaron tres pruebas, y cada prueba se midió por triplicado.

**Tabla A1.1 Resultados de pruebas de pH, CE y Eh del suelo**

	pH	Conductividad Eléctrica (μS/ cm)	Potencial Redox (mV)
$\bar{X}$	6.11	70.33	259.33
$\sigma$	0.05	2.29	2.82

### A1.2 Humedad del suelo (θ) secado en estufa a 105° C ± 5 °C

La humedad del suelo se determinó a partir de la siguiente ecuación:

$$\Theta = \frac{(Pc + Psh) - (Pc + Pss)}{(Pc + Pss) - Pc} * 100$$

Donde,

Θ = % de humedad del suelo

Pc = Peso del crisol (g).

Psh = Peso del suelo húmedo (g).

Pc + Psh = Peso del crisol más peso del suelo húmedo (g).

Pc + Pss = Peso del crisol más peso del suelo seco (g).

Se realizaron 5 pruebas y el resultado promedio se muestra a continuación.

**Tabla A1.2 Resultados del % de humedad en el suelo (Θ)**

	Θ
$\bar{X}$	7.15
$\sigma$	1.87



### A1.3 Materia volátil (MV) en suelo y materia fija (MF) en suelo

Se determinó la materia volátil y fija del suelo a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\% \text{ Materia volátiles} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} * 100$$

$$\% \text{ Materia fija} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} * 100$$

Las pruebas se determinaron por cuadruplicado, y los resultados promedio se muestran en la tabla A1.3

**Tabla A1.3 Resultados de las pruebas de materia volátil (MV) y materia fija (MF) en suelo.**

	% MV	% MF
$\bar{X}$	13.68	86.30
$\sigma$	0.83	0.995

### A1.4 Materia orgánica (MO) del suelo

La materia orgánica del suelo se determinó a partir de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Carbón Orgánico} = \left(\frac{B-T}{g}\right)(0.1N) (0.39) (\text{fch})$$

$$\% \text{ Materia orgánica} = \% \text{ C Orgánico} \times 1.724$$

Donde,

B = volumen de FeSO<sub>4</sub> gastado en el blanco (mL).

T = volumen de FeSO<sub>4</sub> gastado en la muestra (mL).

N = normalidad exacta del FeSO<sub>4</sub> = 0.1

fch = factor de corrección de humedad.

Las pruebas se determinaron por triplicado y los resultados promedio se muestra en la tabla A1.4.

**Tabla 1.4 Resultados de las pruebas de materia orgánica en suelo**

	% CO	% MO
$\bar{X}$	0.706	1.218
$\sigma$	0.085	0.147



### A1.5 Nitrógeno total (Nt) en suelo

Se determinó el nitrógeno total contenido en el suelo a partir de la digestión ácida de la muestra, la ecuación utilizada es la siguiente:

$$Nt = \frac{(VH_2SO_4m - VH_2SO_4b)(0.021N)(14)(1000)}{gdesuelo} = \frac{mgNt}{Kgdesuelo}$$

Donde,

V H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> m = es el volumen de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> gastado en la muestra de suelo

V H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> b = es el volumen de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> gastado en el blanco

N = es la normalidad exacta del H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 0.021

Las pruebas se realizaron por triplicado y el valor promedio se muestra en la tabla A1.5.

**Tabla A1.5 Resultados de nitrógeno total (Nt) en digestión ácida de suelo**

	$\frac{mg\ Nt}{Kg\ de\ suelo}$
$\bar{X}$	1037.47
$\sigma$	32.97

### A1.6 Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> y Na<sup>+</sup> determinados en el suelo

Se determinaron los siguientes elementos: Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> y Na<sup>+</sup> en el suelo, a partir de la digestión ácida de la muestra.

Para realizar el cálculo de la concentración final en mg / Kg, del elemento en el suelo, se partió de la siguiente ecuación:

$$\frac{mg\ [X]}{L} \times \text{Factor de dilución} \times \frac{\text{Aforo (L)}}{\text{Peso de suelo (g)}} \times \frac{1000\ g}{1\ Kg} = \frac{mg\ [X]}{Kg}$$

Donde,

[X] = concentración de Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> y Na<sup>+</sup>

Aforo = 0.1 L

Se realizaron 3 digestiones a partir de 1.0, 1.5 y 2.0 g de suelo. Los resultados promedio de estas pruebas se muestran en la tabla A1.6.1, en la tabla A1.6.2 se definen los límites de detección del equipo para los elementos analizados.



**Tabla A1.6.1 Resultados de concentraciones totales de, magnesio (Mg<sup>2+</sup>), calcio (Ca<sup>2+</sup>), potasio (K<sup>+</sup>) y sodio (Na<sup>+</sup>) en digestión ácida de suelo**

	$\frac{\text{mg Mg}^{2+}}{\text{Kg}}$	$\frac{\text{mg Ca}^{2+}}{\text{Kg}}$	$\frac{\text{mg K}^+}{\text{Kg}}$	$\frac{\text{mg Na}^+}{\text{Kg}}$
$\bar{X}$	1123.66	78.899	884.94	486.0
$\sigma$	438	7.87	57.79	179.5

Los límites de detección del equipo para cada elemento se muestran a continuación:

**Tabla A1.6.2 Límites de detección del equipo de espectrofotometría de absorción atómica**

Elemento	Límite de detección del equipo (mg / L)
Magnesio	0.19 – 9
Calcio	0.092 – 4
Potasio	0.083 - 20
Sodio	1.7 - 80

### A1.7 Aniones (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) determinados en el lixiviado del suelo

Los aniones (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), se midieron con el lixiviado de suelo de acuerdo a lo descrito en el capítulo 2, inciso 2.3.7.

Para realizar el cálculo de la concentración final en mg / Kg, del anión en el suelo se partió de la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{mg [Z]}}{\text{L}} \times \frac{\text{Aforo (L)}}{\text{Peso de suelo (g)}} \times \frac{1000 \text{ g de suelo}}{1 \text{ Kg de suelo}} = \frac{\text{mg [Z]}}{\text{Kg de suelo}}$$

Donde,

[Z] = Concentración de PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

Aforo = 0.35 L

Peso de suelo = 70 g de suelo

Cada parámetro se determinó por triplicado y los valores promedio se muestran en la tabla A1.7.1, en la tabla A1.7.2 se definen los límites de detección del equipo para cada parámetro analizado



**Tabla A1.7.1 Resultados de fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ), nitritos ( $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ) en el lixiviado de suelo**

	$\frac{\text{mg PO}_4^{3-}\text{-P}}{\text{Kg}}$	$\frac{\text{mg NO}_2^-\text{-N}}{\text{Kg}}$	$\frac{\text{mg NO}_3^-\text{-N}}{\text{Kg}}$
$\bar{X}$	0.48	0.18	9.3
$\sigma$	0.40	0.07	2.25

**Tabla A1.7.2 Límites de detección del equipo de espectrofotometría.**

Elemento	Límite de detección del equipo (mg / L)
Fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ )	0.05 – 5.00
Nitritos ( $\text{NO}_2^-\text{-N}$ )	0.02 – 1.00
nitratos( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ )	1.0 – 25.0

### A1.8 Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) del suelo

Se determinó la CIC del suelo a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{CIC} = \frac{100}{\text{alícuota}} \times \frac{100}{\text{peso de suelo}} (V) (0.022 \text{ N}) (2)$$

Donde,

Alícuota = 10 mL

V = volumen en mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  gastados al titular la muestra

N = normalidad exacta del  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , = 0.022

Las pruebas se realizaron por cuadruplicado, el resultado promedio se muestra en la tabla A1.8.

**Tabla A1.8 Resultados de CIC en suelo**

	$\frac{\text{CIC Cmol (+)}}{\text{Kg}}$
$\bar{X}$	25.30
$\sigma$	0.51



## A2 CARACTERIZACIÓN DE LA ORINA HUMANA

### A2.1 pH, conductividad eléctrica (CE) y potencial redox (Eh), en orina

Para determinar cada parámetro, las pruebas se realizaron por triplicado.

**Tabla A2.1 Resultados de pruebas de pH y CE en orina**

	pH	Conductividad Eléctrica (mS/ cm)
$\bar{X}$	9.08	38.8
$\sigma$	0.06	0.05

### A2.2 Sólidos totales (ST), sólidos volátiles totales (SVT), sólidos suspendidos totales (SST) y Sólidos disueltos (SD) en orina.

Se determinaron los sólidos en todas sus formas, en la muestra de orina, se partieron las de las siguientes ecuaciones:

$$ST = \frac{(Pesofinal - Pesoinicial) * 1000}{Volumenmuestra}$$

$$SVT = \frac{(Pesoinicial - Pesofinal) * 1000}{Volumenmuestra}$$

$$SST = \frac{(Pesofinal - Pesoinicial) * 1000}{Volumenmuestra}$$

$$SD = ST - SST$$

Cada parámetro se determinó por triplicado, los valores promedio se muestran en la tabla A2.2

**Tabla A2.2 Resultado de sólidos totales (ST), sólidos volátiles totales (SVT), sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos disueltos (SD) en orina**

	ST (mg/L)	SVT (mg/L)	SST (mg/L)	SD (mg/L)
$\bar{X}$	12037.5	2842.5	196.6	11840.8
$\sigma$	756.7	28.5	35.1	783.7

### A2.3 Nitrógeno total (Nt) y amoniacal (NH<sub>3</sub>-N) en orina

Para realizar el cálculo de la concentración final de nitrógeno total o amoniacal en mg / L de orina se partió de la siguiente ecuación:



$$Nt \text{ ó } NH_3-N = \frac{(VH_2SO_4m - VH_2SO_4b)(0.021N)(14)(1000)}{mLdeorina} = \frac{mgNt \text{ ó } NH_3 - N}{Ldeorina}$$

Donde,

V H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> m = Volumen de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> gastado en la muestra de orina

V H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> b = volumen de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> gastado en el blanco

N = normalidad exacta del H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 0.021

Se realizaron 6 pruebas por cada parámetro, y los resultados promedios se muestran en la tabla A2.3

**Tabla A2.3 Resultados de nitrógeno total (Nt) y nitrógeno amoniacal (NH<sub>3</sub>-N) en orina**

	$\frac{mg \text{ Nt}}{L \text{ de orina}}$	$\frac{mg \text{ NH}_3 - N}{L \text{ de orina}}$
$\bar{X}$	6090.7	5884.9
$\sigma$	70.6	68.1

#### A2.4 Aniones (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en la orina

Se determinaron los aniones en la muestra de orina, para su lectura, para determinar la concentración final del anión en la muestra se partió de la siguiente ecuación:

$$\frac{mg [Z]}{L} \times \text{Factor de dilución}$$

Donde,

[Z] = Concentración de PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

Las pruebas se realizaron por triplicado para cada parámetro., los valores promedio obtenidos se resumen en la tabla A2.4.

**Tabla A2.4 Resultados de fosfatos (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> - P), nitritos (NO<sub>2</sub><sup>-</sup> - N) y nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N) en orina**

	$\frac{mg \text{ PO}_4^{3-} - P}{Kg}$	$\frac{mg \text{ NO}_2^- - N}{Kg}$	$\frac{mg \text{ NO}_3^- - N}{Kg}$
$\bar{X}$	241.53	1.983	78.833
$\sigma$	2.00	0.495	12.964



## A2.5 Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> y Na<sup>+</sup> determinados en orina

Se determinaron los siguientes elementos: Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> y Na<sup>+</sup> en la orina. Para realizar el cálculo de la concentración final en mg / L, del elemento en la orina, se partió de la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{mg totales [X]}}{\text{L}} \times \frac{\text{Aforo L}}{\text{Vol.de orina (mL)}} \times \frac{1000 \text{ mL de orina}}{1 \text{ L de orina}} = \frac{\text{mg [X]}}{\text{L de orina}}$$

Donde,

[X] = concentración de Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> y Na<sup>+</sup>

Aforo = 0.1L

Cada parámetro se determinó por cuadruplicado, los resultados promedios se muestran en la tabla A2.5

**Tabla A2.5 Resultados de magnesio (Mg<sup>2+</sup>), calcio (Ca<sup>2+</sup>), potasio (K<sup>+</sup>) y sodio (Na<sup>+</sup>) en orina**

	$\frac{\text{mg Mg}^{2+}}{\text{L de orina}}$	$\frac{\text{mg Ca}^{2+}}{\text{L de orina}}$	$\frac{\text{mg K}^{+}}{\text{L de orina}}$	$\frac{\text{mg Na}^{+}}{\text{L de orina}}$
$\bar{X}$	10.159	14.912	1560.58	2620.1
$\sigma$	5.403	6.191	35.25	70.15

## A3 CARACTERIZACIÓN DE LAS HECES HUMANAS

### A3.1 Materia volátil (MV) y materia fija (MF) en heces

Se determinó la materia volátil y fija en las heces a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\% \text{ Materia volátiles} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} * 100$$

$$\% \text{ Materia fija} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} * 100$$

Las pruebas se determinaron por cuadruplicado, y los resultados promedio se muestran en la tabla A3.1

**Tabla A3.1 Resultados de las pruebas de materia volátil (MV) y materia fija (MF) en suelo**

	% MV	% MF
$\bar{X}$	85.328	14.672
$\sigma$	1.16	1.16



### A3.2 Nitrógeno total (Nt) en heces a partir de digestión ácida de la muestra

Se determinó el nitrógeno total contenido en el suelo a partir de la digestión ácida de la muestra, la ecuación utilizada es la siguiente:

$$Nt = \frac{(VH_2SO_4m - VH_2SO_4b)(0.021N)(14)(1000)}{gdeheces} = \frac{mgNt}{Kgdeheces}$$

Donde,

V H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> m = es el volumen de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> gastado en la muestra de heces

V H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> b = es el volumen de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> gastado en el blanco

N = es la normalidad exacta del H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 0.021

Se realizaron cinco pruebas y el valor promedio se muestra en la tabla A3.2.

**Tabla A3.2 Resultados de nitrógeno total (Nt) en heces**

	$\frac{mg\ Nt}{Kg\ de\ heces}$
$\bar{X}$	45180.42
$\sigma$	282.63

### A3.3 Aniones totales (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en digestión ácida de heces

Los aniones (PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), en heces se midieron a partir de la digestión ácida de la muestra. Cada prueba se realizó por triplicado.

Para realizar el cálculo de la concentración final en mg / Kg, del anión en las heces se partió de la siguiente ecuación:

$$\frac{mg\ [Z]}{L} \times \frac{0.1\ L}{g\ de\ heces} \times \frac{1000\ g\ de\ heces}{1\ Kg\ de\ heces} = \frac{mg\ [Z]}{Kg\ de\ heces}$$

Donde,

[Z], concentración de PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en heces.

Las pruebas se realizaron por cuadruplicado, para cada parámetro analizado, las digestiones de heces correspondían a 0.2, 0.25, 0.5 y 1.0 g de muestra de heces. Los valores promedio de éstos resultados se muestran en la tabla A3.3.

**Tabla A3.3 Resultados de las concentraciones totales de, fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ), nitritos ( $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ) en digestión de heces**

	$\frac{\text{mg PO}_4^{3-}\text{-P}}{\text{Kg}}$	$\frac{\text{mg NO}_2^-\text{-N}}{\text{Kg}}$	$\frac{\text{mg NO}_3^-\text{-N}}{\text{Kg}}$
$\bar{X}$	20.583	11.87	994.16
$\sigma$	12.985	3.78	387.13

#### A3.4 $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{K}^+$ y $\text{Na}^+$ determinados en las heces

Se determinaron los siguientes elementos:  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$  en las heces, a partir de la digestión ácida de la muestra de heces. Para realizar el cálculo de la concentración final en mg / Kg, del elemento en las heces, se partió de la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{mg totales [X]}}{\text{L}} \times \text{Factor de dilución} \times \frac{\text{Aforo (L)}}{\text{Peso de heces (g)}} \times \frac{1000 \text{ g de heces}}{1 \text{ Kg de heces}} = \frac{\text{mg [X]}}{\text{Kg de heces}}$$

Donde,

[X], concentración de  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ , medido en las heces.

Aforo = 0.1 L

Cada parámetro se determinó por cuadruplicado, los valores promedios se muestran en la tabla A3.4.

Se realizaron 4 digestiones a partir de 0.2, 0.25, 0.5 y 1.0 g de heces. Los resultados promedio de estas pruebas se muestran en la tabla A3.4.

**Tabla A3.4 Resultados de concentraciones totales de, magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ) y sodio ( $\text{Na}^+$ ) en digestión ácida de heces**

	$\frac{\text{mg Mg}^{2+}}{\text{Kg}}$	$\frac{\text{mg Ca}^{2+}}{\text{Kg}}$	$\frac{\text{mg K}^+}{\text{Kg}}$	$\frac{\text{mg Na}^+}{\text{Kg}}$
$\bar{X}$	4104.9	1971.7	5650.6	1412.5
$\sigma$	553.6	315.4	1672.9	144.2



# ANEXO B

En este anexo se muestran las tablas de resultados del análisis del suelo después del cultivo, descritos en el capítulo 3, inciso 3.3.

## B1 ANIONES ( $\text{PO}_4^{3-}$ , $\text{NO}_2^-$ , $\text{NO}_3^-$ ) EN SUELO DESPUÉS DE CULTIVAR

Los aniones ( $\text{PO}_4^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ), se midieron con el lixiviado de suelo de acuerdo a lo descrito en el capítulo 2, inciso 2.3.7. El cual se obtuvo mezclando 70 g de suelo, en 350 mL de agua. Para realizar el cálculo de la concentración final en mg / Kg, del anión en el suelo se partió de la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{mg [Z]}}{\text{L}} \times \frac{\text{Aforo (L)}}{\text{Peso del suelo (g)}} \times \frac{1000 \text{ g de suelo}}{1 \text{ Kg de suelo}} = \frac{\text{mg [Z]}}{\text{Kg de suelo}}$$

Donde,

[Z], concentración de  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ .

Aforo = 0.35 L

Peso del suelo = 70 g

Cada tratamiento tiene 4 réplicas, y cada réplica se hizo por triplicado.

### B1.1 Nitritos ( $\text{NO}_2^-$ - N) en suelo después de cultivar.

**Tabla B1.1 Resultados de nitritos ( $\text{NO}_2^-$  - N), en el lixiviado de suelo para los tratamientos T1-T4**

Tratamiento	$\bar{X} \pm \sigma$
T1. AGUA	0.21 ± 0.018
T2. ORINA 1	0.154 ± 0.05
T3. ORINA 1 + HECES 1	0.128 ± 0.01
T4. ORINA 1 + HECES 2	1.42 ± 0.8



## B1.2 Nitratos ( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ) en suelo después de cultivar.

Tabla B1.2 Resultados de nitratos ( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ), en el lixiviado de suelo para los tratamientos T1-T3

Tratamiento	$\bar{X} \pm \sigma$
T1. AGUA	15.1 $\pm$ 0.43
T2. ORINA 1	59.8 $\pm$ 0.21
T3. ORINA 1 + HECES 1	09.5 $\pm$ 0.37
T4. ORINA 1 + HECES 2	191.9 $\pm$ 59.79

## B1.3 Fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ ) en suelo después de cultivar.

Tabla B1.3 Resultados de fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ ), en el lixiviado de suelo de para los tratamientos T1-T4

Tratamiento	$\bar{X} \pm \sigma$
T1. AGUA	<0.2 $\pm$ 0.0
T2. ORINA 1	0.52 $\pm$ 0.48
T3. ORINA 1 + HECES 1	<0.2 $\pm$ 0.0
T4. ORINA 1 + HECES 2	1.05 $\pm$ 31

## B2 pH y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE) EN SUELO DESPUÉS DE CULTIVAR

Cada tratamiento tiene 4 réplicas, y cada réplica se hizo por triplicado.

### B2.1 pH y conductividad (CE) en suelo después de cultivar

Tabla B2.1 Resultado de pH y CE en suelo, para los tratamientos T1-T4

Tratamiento	pH	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
	$\bar{X} \pm \sigma$	$\bar{X} \pm \sigma$
T1. AGUA	5.96 $\pm$ 0.03	80 $\pm$ 12
T2. ORINA 1	5.46 $\pm$ 0.04	270 $\pm$ 14
T3. ORINA 1 + HECES 1	6.25 $\pm$ 0.14	106 $\pm$ 44
T4. ORINA 1 + HECES 2	5.95 $\pm$ 0.1	639 $\pm$ 128



## B3 MATERIA ORGÁNICA (MO) EN SUELO, DESPUÉS DE CULTIVAR

### B3.1 Materia orgánica (MO) en suelo, después de cultivar para T1-T4

Para los cálculos del % C Orgánico, el  $\text{FeSO}_4$  gastado en el blanco corresponde a 10.6 mL, para todos los casos. Cada tratamiento tiene 4 réplicas, y cada réplica se hizo por triplicado.

Para determinar la materia orgánica del suelo, se tiene la siguiente ecuación:

$$\% \text{ C Orgánico} = \left( \frac{B-T}{g} \right) (0.1 \text{ N}) (0.39) (\text{fch})$$

$$\% \text{ Materia orgánica} = \% \text{ C Orgánico} \times 1.724$$

Donde,

B = Volumen de  $\text{FeSO}_4$  gastado en el blanco = 10.6 (mL);

T = Volumen de  $\text{FeSO}_4$  gastado en la muestra (mL),

N = Normalidad exacta del  $\text{FeSO}_4$  = 0.1

fch = Factor de corrección de humedad.

Los factores de corrección de humedad para cada tratamiento son los siguientes:

Tratamiento	Factor de corrección de humedad
T1. AGUA	11.63
T2. ORINA 1	11.95
T3. ORINA 1 + HECES 1	10.89
T4. ORINA 1 + HECES 2	15.43

**Tabla B3.1 Resultados de materia orgánica (MO) en suelo, para los tratamientos T1-T4**

Tratamiento	% MO $\bar{X} \pm \sigma$
T1. AGUA	2.11 ± 14
T2. ORINA 1	2.19 ± 0.14
T3. ORINA 1 + HECES 1	3.38 ± 0.21
T4. ORINA 1 + HECES 2	5.08 ± 31



## B4 CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (CIC) EN EL SUELO, DESPUÉS DE CULTIVAR

### B4.1 Capacidad de intercambio catiónico (CIC) en el suelo, después de cultivar para T1-T4

NOTA: para la determinación de la CIC en los tratamientos T1 y T2 la normalidad del H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> fue de N= 0.021, para los tratamientos T3 y T3, N= 0.022.

Cada tratamiento tiene 4 réplicas, y cada réplica se hizo por cuadruplicado. Los valores presentados en la siguiente tabla, son los promedios de esos resultados.

La CIC del suelo se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{CIC} = \frac{100}{\text{alícuota}} \times \frac{100}{\text{peso de suelo}} (\text{V}) (\text{N})(2)$$

Donde,

Alícuota, 10 mL

V = volumen en mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> gastados al titular la muestra

N = normalidad exacta del H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,

**Tabla B4.1 Resultados de CIC en suelo, para los tratamientos T1-T4**

Tratamiento	CIC $\bar{X} \pm \sigma$
T1. AGUA	28.1 ± 0.9
T2. ORINA 1	30.4 ± 3.5
T3. ORINA 1 + HECES 1	31.0 ± 2.0
T4. ORINA 1 + HECES 2	28.3 ± 0.5

## B5. BASES INTERCAMBIABLES EN SUELO, DESPUÉS DE CULTIVAR

Para determinar las bases intercambiables, cada réplica de tratamiento, se midió por duplicado. Los valores mostrados en la siguiente tabla, son valores promedio de dichos resultados.

### B5.1 Calcio (Ca<sup>2+</sup>) intercambiable en suelo, después de cultivar para T1-T4

Para determinar el calcio intercambiable en las muestras de suelo después de cultivar, se parte de la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{Cmol Ca}^{2+}}{\text{Kg}} = \frac{9.98 (a)}{W}$$



Donde:

a = Concentración total de  $\text{Ca}^{2+}$  medida en la muestra (mg/L).

W = Peso del suelo seco (g).

**Tabla B5.1 Resultados de calcio intercambiable ( $\text{Ca}^{2+}$ ) en suelo, para los tratamientos T1-T4 y el suelo inicial T0**

Tratamiento	$\frac{\text{Cmol Ca}^{2+}}{\text{Kg}}$
	$\bar{X} \pm \sigma$
T0. SUELO INICIAL	106.06 $\pm$ 3.11
T1. AGUA	106.44 $\pm$ 5.03
T2. ORINA 1	109.70 $\pm$ 6.52
T3. ORINA 1 + HECES 1	123.62 $\pm$ 7.12
T4. ORINA 1 + HECES 2	161.06 $\pm$ 3.24

### **B5.2 Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) en suelo, después de cultivar para T1-T4**

Para determinar el magnesio intercambiable en las muestras de suelo después de cultivar, se parte de la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{Cmol Mg}^{2+}}{\text{Kg}} = \frac{16.447 (a)}{W}$$

Donde:

a = Concentración total de  $\text{Mg}^{2+}$  medida en la muestra (mg/L).

W = Peso del suelo seco (g).



**Tabla B5.2 Resultados de magnesio ( $Mg^{2+}$ ) en suelo, para los tratamientos T1-T4 y el suelo inicial T0**

Tratamiento	$\frac{Cmol Mg^{2+}}{Kg}$
	$\bar{X} \pm \sigma$
T0. SUELO INICIAL	91.54 $\pm$ 3.31
T1. AGUA	96.05 $\pm$ 2.44
T2. ORINA 1	95.40 $\pm$ 4.64
T3. ORINA 1 + HECES 1	96.09 $\pm$ 3.61
T4. ORINA 1 + HECES 2	105.04 $\pm$ 4.12

### B5.3 Potasio ( $K^+$ ) en suelo, después de cultivar para T1-T4

Para determinar el potasio intercambiable en las muestras de suelo después de cultivar, se parte de la siguiente ecuación:

$$\frac{Cmol K^+}{Kg} = \frac{2.557 (a)}{W}$$

Donde:

a = Concentración total de  $K^+$  medida en la muestra (mg/L)

W = Peso del suelo seco (g).

**Tabla B5.3 Resultados de potasio ( $K^+$ ) en suelo, para los tratamientos T1-T4 y el suelo inicial T0**

Tratamiento	$\frac{Cmol K^+}{Kg}$
	$\bar{X} \pm \sigma$
T0. SUELO INICIAL	8.33 $\pm$ 0.15
T1. AGUA	5.76 $\pm$ 0.06
T2. ORINA 1	5.95 $\pm$ 0.07
T3. ORINA 1 + HECES 1	5.41 $\pm$ 1.49
T4. ORINA 1 + HECES 2	10.66 $\pm$ 0.81



### B5.4 Sodio (Na<sup>+</sup>) en suelo, después de cultivar para T1-T4

Para determinar el sodio intercambiable en las muestras de suelo después de cultivar, se parte de la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{Cmol Na}^+}{\text{Kg}} = \frac{4.347 (a)}{W}$$

Donde:

a = Concentración total de Na<sup>+</sup> medida en la muestra (mg/L).

W = Peso del suelo seco (g).

**Tabla B5.4 Resultados de sodio (Na<sup>+</sup>) en suelo, para los tratamientos T1-T4 y el suelo inicial T0**

Tratamiento	$\frac{\text{Cmol Na}^+}{\text{Kg}}$
	$\bar{X} \pm \sigma$
T0. SUELO INICIAL	2.56 ± 0.29
T1. AGUA	2.34 ± 0.35
T2. ORINA 1	2.88 ± 0.47
T3. ORINA 1 + HECES 1	5.71 ± 0.06
T4. ORINA 1 + HECES 2	7.19 ± 0.45

### B6 CATIONES LIXIVIALES (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> Y K<sup>+</sup>) EN SUELO, DESPUÉS DE CULTIVAR

Los cationes lixiviables (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> Y K<sup>+</sup>) se midieron con el lixiviado de suelo de acuerdo a lo descrito en el capítulo 2, inciso 2.3.7. El cual se obtuvo mezclando 70 g de suelo, en 350 mL de agua. Para realizar el cálculo de la concentración final en Cmol / Kg, del catión en el suelo se partió de la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{mg tot. [X]}}{\text{L}} \times \frac{\text{Aforo (L)}}{70 \text{ g de suelo}} \times \frac{1000 \text{ g de suelo}}{1 \text{ Kg de suelo}} = \frac{\text{mg [X]}}{\text{Kg de suelo}} \times \frac{1 \text{ g [X]}}{1000 \text{ mg [X]}} \times \frac{1 \text{ mol [X]}}{\text{MA g [X]}} \times \frac{100 \text{ Cmol [X]}}{1 \text{ mol [X]}} = \frac{\text{Cmol [X]}}{\text{Kg de suelo}}$$

Donde,

[X] = concentración de Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> y Na<sup>+</sup>, medido en el lixiviado del suelo.

MA [X] = masa atómica de Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> y Na<sup>+</sup>.

Aforo = 0.35 L



Peso del suelo = 70 g

Por cada réplica de tratamiento se hizo una prueba de lixiviación, los resultados presentados en las siguientes tablas son los promedios finales obtenidos por tratamiento.

### B6.1 Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) lixiviable en suelo, después de cultivar para T1-T4

Tabla B6.1 Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) en suelo, después de cultivar para los tratamientos T1-T4

Tratamiento	$\frac{\text{Cmol Ca}^{2+}}{\text{Kg}}$
	$\bar{X} \pm \sigma$
T1. AGUA	0.034 $\pm$ 0.011
T2. ORINA 1	0.098 $\pm$ 0.005
T3. ORINA 1 + HECES 1	0.093 $\pm$ 0.011
T4. ORINA 1 + HECES 2	0.301 $\pm$ 0.07

### B6.2 Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) lixiviable en suelo, después de cultivar para T1-T4

Tabla B6.2 Resultados de magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) en suelo, para los tratamientos T1-T4

Tratamiento	$\frac{\text{Cmol Mg}^{2+}}{\text{Kg}}$
	$\bar{X} \pm \sigma$
T1. AGUA	0.091 $\pm$ 0.006
T2. ORINA 1	0.091 $\pm$ 0.006
T3. ORINA 1 + HECES 1	0.048 $\pm$ 0.011
T4. ORINA 1 + HECES 2	0.127 $\pm$ 0.03



### B6.3 Sodio ( $\text{Na}^+$ ) lixiviable en suelo, después de cultivar para T1-T4

Tabla B6.3 Resultados de sodio ( $\text{Na}^+$ ) en suelo, para los tratamientos T1-T4

Tratamiento	$\frac{\text{Cmol Na}^+}{\text{Kg}}$
	$\bar{X} \pm \sigma$
T1. AGUA	$0.056 \pm 0.025$
T2. ORINA 1	$0.130 \pm 0.004$
T3. ORINA 1 + HECES 1	$0.168 \pm 0.016$
T4. ORINA 1 + HECES 2	$0.222 \pm 0.016$

### B6.4 Potasio ( $\text{K}^+$ ) lixiviable en suelo, después de cultivar para T1-T4

Tabla B6.4 Resultados de potasio ( $\text{K}^+$ ) en suelo, para los tratamientos T1-T4

Tratamiento	$\frac{\text{Cmol K}^+}{\text{Kg}}$
	$\bar{X} \pm \sigma$
T1. AGUA	$0.032 \pm 0.002$
T2. ORINA 1	$0.064 \pm 0.0$
T3. ORINA 1 + HECES 1	$0.020 \pm 0.012$
T4. ORINA 1 + HECES 2	$0.113 \pm 0.022$



# ANEXO C

En este anexo se muestran las tablas de resultados los análisis de la planta, raíz y jitomate descritos en el capítulo 3, inciso 3.4 y 3.5. Se determinaron los siguientes elementos:  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$  y  $Na^+$  en la planta, raíz y jitomate, a partir de la digestión ácida de la muestra.

Para realizar el cálculo de la concentración final en Cmol / Kg, del catión en el suelo se partió de la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{mg tot.}[X]}{\text{L}} \times \frac{\text{Aforo (L)}}{\text{Peso (g)}} \times \frac{1000 \text{ g} = \text{mg [X]}}{1 \text{ Kg}} \times \frac{1 \text{ g [X]}}{1000 \text{ mg [X]}} \times \frac{1 \text{ mol [X]}}{\text{MA g [X]}} \times \frac{100 \text{ Cmol [X]}}{1 \text{ mol [X]}} = \frac{\text{Cmol [X]}}{\text{Kg}}$$

Donde,

[X], concentración de  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$  y  $Na^+$ , medido en la digestión del suelo, planta o raíz.

MA [X], masa atómica de  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$  y  $Na^+$ .

Se realizó una digestión por réplica de tratamiento los resultados presentados en las siguientes tablas, son los promedios finales obtenidos por tratamiento.

## C1 CONTENIDO DE CATIONES ( $Ca^{2+}$ , $Mg^{2+}$ , $Na^+$ Y $K^+$ ) EN PLANTA

### C1.1 Contenido de calcio total ( $Ca^{2+}$ ) en digestión de planta, para T1-T4

Tabla C1.1 Resultados de calcio ( $Ca^{2+}$ ) en planta, para los tratamientos T1-T4

Tratamiento	$\frac{\text{Cmol } Ca^{2+}}{\text{Kg}}$
	$\bar{X} \pm \sigma$
T1. AGUA	63.39 ± 15.14
T2. ORINA 1	72.08 ± 6.48
T3. ORINA 1 + HECES 1	64.73 ± 16.4
T4. ORINA 1 + HECES 2	96.65 ± 8.71



## C1.2 Contenido de magnesio total ( $Mg^{2+}$ ) en digestión de planta, para T1-T4

Tabla C1.2 Resultados de magnesio ( $Mg^{2+}$ ) en planta, para los tratamientos T1-T4

Tratamiento	$\frac{Cmol Mg^{2+}}{Kg}$
	$\bar{X} \pm \sigma$
T1. AGUA	106.17 $\pm$ 25.26
T2. ORINA 1	91.50 $\pm$ 12.84
T3. ORINA 1 + HECES 1	56.66 $\pm$ 9.86
T4. ORINA 1 + HECES 2	72.54 $\pm$ 6.35

## C1.3 Contenido de potasio total ( $K^+$ ) en digestión de planta, para T1-T4

Tabla C1.3 Resultados de potasio ( $K^+$ ) en planta, para los tratamientos T1-T4

Tratamiento	$\frac{Cmol K^+}{Kg}$
	$\bar{X} \pm \sigma$
T1. AGUA	12.50 $\pm$ 3.07
T2. ORINA 1	58.74 $\pm$ 6.15
T3. ORINA 1 + HECES 1	92.76 $\pm$ 14.49
T4. ORINA 1 + HECES 2	81.49 $\pm$ 8.79

## C1.4 Contenido de sodio total ( $Na^+$ ) en digestión de planta, para T1-T4

Tabla C1.4 Resultados sodio ( $Na^+$ ) en planta, para los tratamientos T1-T4

Tratamiento	$\frac{Cmol Na^+}{Kg}$
	$\bar{X} \pm \sigma$
T1. AGUA	3.05 $\pm$ 0.35
T2. ORINA 1	4.67 $\pm$ 0.44
T3. ORINA 1 + HECES 1	3.37 $\pm$ 0.54
T4. ORINA 1 + HECES 2	3.84 $\pm$ 0.49



## C2 CONTENIDO DE CATIONES ( $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Na}^+$ Y $\text{K}^+$ ) EN RAÍZ

### C2.1 Contenido de calcio total ( $\text{Ca}^{2+}$ ) en digestión de raíz, para T1-T4

Tabla C2.1.1 Resultados para el contenido de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) en raíz, para T1-T4

Tratamiento	$\frac{\text{Cmol Ca}^{2+}}{\text{Kg}}$
	$\bar{X} \pm \sigma$
T1. AGUA	35.93 $\pm$ 20.55
T2. ORINA 1	25.06 $\pm$ 4.62
T3. ORINA 1 + HECES 1	18.89 $\pm$ 4.06
T4. ORINA 1 + HECES 2	31.63 $\pm$ 4.32

### C2.2 Contenido de magnesio total ( $\text{Mg}^{2+}$ ) en digestión de raíz, para T1-T4

Tabla C2.2 Resultados para el contenido de magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) en raíz, para los tratamientos T1-T4

Tratamiento	$\frac{\text{Cmol Mg}^{2+}}{\text{Kg}}$
	$\bar{X} \pm \sigma$
T1. AGUA	18.23 $\pm$ 5.58
T2. ORINA 1	17.84 $\pm$ 1.94
T3. ORINA 1 + HECES 1	6.98 $\pm$ 3.15
T4. ORINA 1 + HECES 2	13.49 $\pm$ 2.96



### C2.3 Contenido de potasio total ( $K^+$ ) en digestión de raíz, para T1-T4

Tabla C2.3 Resultados para el contenido de potasio ( $K^+$ ) en raíz, para los tratamientos T1-T4

Tratamiento	$\frac{\text{Cmol } K^+}{\text{Kg}}$ $\bar{X} \pm \sigma$
T1. AGUA	10.32 $\pm$ 5.64
T2. ORINA 1	10.34 $\pm$ 5.82
T3. ORINA 1 + HECES 1	44.10 $\pm$ 9.48
T4. ORINA 1 + HECES 2	51.90 $\pm$ 19.41

### C2.4 Contenido de sodio total ( $Na^+$ ) en digestión de raíz, para T1-T4

Tabla C2.4 Resultados para el contenido de sodio ( $Na^+$ ) en raíz, para los tratamientos T1-T4

Tratamiento	$\frac{\text{Cmol } Na^+}{\text{Kg}}$ $\bar{X} \pm \sigma$
T1. AGUA	14.85 $\pm$ 1.45
T2. ORINA 1	6.51 $\pm$ 1.39
T3. ORINA 1 + HECES 1	6.54 $\pm$ 1.22
T4. ORINA 1 + HECES 2	9.44 $\pm$ 2.16

### C3 CONTENIDO DE CATIONES ( $Ca^{2+}$ , $Mg^{2+}$ , $Na^+$ Y $K^+$ ) EN JITOMATE

#### C3.1 Contenido de calcio ( $Ca^{2+}$ ) en digestión de jitomate, para T3 y T4

Tabla C3.1 Resultados para el contenido de calcio ( $Ca^{2+}$ ) en jitomate, para los tratamientos T3 y T4

Tratamiento	$\frac{\text{Cmol } Ca^{2+}}{\text{Kg}}$ $\bar{X} \pm \sigma$
T3. ORINA 1 + HECES 1	1.21 $\pm$ 0.07
T4. ORINA 1 + HECES 2	1.64 $\pm$ 0.41



### C3.2 Contenido de magnesio ( $Mg^{2+}$ ) en digestión de jitomate, para T3 y T4

Tabla C3.2 Resultados para el contenido de magnesio ( $Mg^{2+}$ ) en jitomate, para los tratamientos T3 y T4

Tratamiento	$\frac{Cmol Mg^{2+}}{Kg}$
	$\bar{X} \pm \sigma$
T3. ORINA 1 + HECES 1	7.18 $\pm$ 1.50
T4. ORINA 1 + HECES 2	7.64 $\pm$ 0.61

### C3.3 Contenido de potasio ( $K^+$ ) en digestión de jitomate, para T3 y T4

Tabla C3.3 Resultados para el contenido de potasio ( $K^+$ ) en jitomate, para los tratamientos T3 y T4

Tratamiento	$\frac{Cmol K^+}{Kg}$
	$\bar{X} \pm \sigma$
T3. ORINA 1 + HECES 1	111.95 $\pm$ 23.34
T4. ORINA 1 + HECES 2	133.98 $\pm$ 31.04

### C3.4 Contenido de sodio ( $Na^+$ ) en digestión de jitomate, para T3 y T4

Tabla C3.4 Resultados para el contenido de sodio ( $Na^+$ ) en jitomate, para los tratamientos T3 y T4

Tratamiento	$\frac{Cmol Na^+}{Kg}$
	$\bar{X} \pm \sigma$
T3. ORINA 1 + HECES 1	1.87 $\pm$ 0.35
T4. ORINA 1 + HECES 2	1.93 $\pm$ 0.32

## C4 CONTENIDO DE NITRÓGENO TOTAL (% Nt) EN JITOMATE

Se determinó el porcentaje de nitrógeno total, en los jitomates de cada tratamiento, cada réplica se hizo por duplicado, los valores de la tabla son promedios de esos resultados. Para determinarlo se partió de la siguiente ecuación:



$$\text{Nt (\%)} = \frac{(T - B)(0.022 N)(1.4)}{S}$$

Donde:

T= mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> gastados en la muestra.

B= mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> gastados en el blanco.

S= peso de la muestra (g).

**Tabla C4.1 Resultados de nitrógeno total (% Nt) en jitomate, para el T3 y T4**

Tratamiento	% Nt en jitomate
	$\bar{X} \pm \sigma$
T3. ORINA 1 + HECES 1	2.19 ± 0.33
T4. ORINA 1 + HECES 2	3.22 ± 0.42



# ANEXO D

En éste anexo se resumen los resultados del análisis de varianza obtenido siguiendo el método unifactorial de acuerdo a la literatura consultada (Montgomery, 19901) el cual se describió en el inciso 2.3.3. Se analizaron diferentes variables, para determinar qué influencia ejercía la dosificación de orina y heces en cada una de ellas dentro de los tratamientos.

Donde:

$$a = 4, n = 4, N = 16$$

Tratamiento 1 = agua, tratamiento 2 = orina, tratamiento 3 = orina + heces 1, tratamiento 4 = orina + heces 2.

## D1 Análisis de varianza unifactorial para el peso de la producción de jitomate en base húmeda

**Tabla D1.1 Datos del peso de jitomate por cada planta**

Tratamiento	Producción de jitomate (g) b.h				Totales (Yi)	Promedios ( $\bar{X}_i$ )
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	934.5	542.1	562.1	1033.6	3072.3	768.08
4	619.1	791.4	975.5	983.4	3369.4	842.35
					<b>6441.7</b>	<b>402.61</b>

**Tabla D1.2 Análisis de varianza para los datos de producción de jitomate**

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media de Cuadrados	F0 calculada	F0 tablas 0.1, 3,12	Conclusión
Entre tratamientos	2604502.23	3	868167.41	<b>36.98</b>	<b>5.95</b>	Se rechaza
Error	281751.698	12	23479.31			
Total	2886253.929	15				



## D2 Análisis de varianza para la cantidad de biomasa (tallos y hojas) en base seca por tratamiento

**Tabla D2.1 Datos de peso de la biomasa por planta**

Tratamiento	Peso de biomasa (g) b.s				Totales (Yi)	Promedios ( $\bar{X}_i$ )
1	0.4	0.7	0.7	0.7	2.5	0.625
2	2.2	1.4	1.8	1.5	6.9	1.725
3	40.1	57.1	29.1	37.5	163.8	40.95
4	54.3	46.4	38.7	37.8	177.2	44.30
					<b>350.4</b>	<b>21.90</b>

**Tabla D2.2 Análisis de varianza para los datos de peso seco de la biomasa**

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media de Cuadrados	F0 calculada	F0 tablas 0.1, 3,12	Conclusión
Entre tratamientos	6897.275	3	2299.09	<b>46.58</b>	<b>5.95</b>	Se rechaza
Error	592.345	12	49.36			
Total	7489.620	15				

## D3 Análisis de varianza para el peso de la raíz en base seca

**Tabla D3.1 Datos de peso de la raíz por planta**

Tratamiento	Peso de raíz (g) b.s				Totales (Yi)	Promedios ( $\bar{X}_i$ )
1	0.0396	0.0321	0.0455	0.0321	0.1493	0.037325
2	0.2399	0.142	0.2029	0.2027	0.7875	0.196875
3	4.4727	5.813	3.38	4.869	18.5347	4.63
4	6.603	5.494	4.8559	4.4145	21.3674	5.34
					<b>40.8389</b>	<b>2.55</b>

**Tabla D3.2 Análisis de varianza para los datos de peso de raíz**

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media de Cuadrados	F0 calculada	F0 tablas 0.1, 3,12	Conclusión
Entre tratamientos	95.947	3	31.98	<b>66.65</b>	<b>5.95</b>	Se rechaza
Error	5.758	12	0.48			
Total	101.706	15				



## D4 Análisis de varianza para la altura de las plantas

**Tabla D4.1 Datos de altura por planta**

Tratamiento	Crecimiento de las plantas (cm)				Totales (Yi)	Promedios ( $\bar{X}_i$ )
1	16.2	20.5	18.8	21.5	77	19.25
2	33	32	39.1	38.5	142.6	35.65
3	104	112	146	120	482	120.50
4	101	105	119	102	427	106.75
					<b>1128.6</b>	<b>70.54</b>

**Tabla D4.2 Análisis de varianza para los datos de altura de la planta**

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media de Cuadrados	F0 calculada	F0 tablas 0.1, 3, 12	Conclusión
Entre tratamientos	30620.5675	3	10206.86	<b>97.19</b>	<b>5.95</b>	Se rechaza
Error	1260.25	12	105.02			
Total	31880.818	15				

## D.5 Análisis de varianza para la capacidad de intercambio catiónico (CIC)

**Tabla D5.1 Datos de la CIC del suelo de cada maceta**

Tratamiento	Crecimiento de las plantas (cm)				Totales (Yi)	Promedios ( $\bar{X}_i$ )
1	26.9	28.3	28.4	28.8	112.4	28.1
2	30	35.5	27.9	28.1	121.5	30.375
3	31	27.5	33	30.1	121.6	30.40
4	28.6	28.8	27.7	28.2	113.3	28.33
					<b>468.8</b>	<b>29.30</b>

**Tabla D5.2 Análisis de varianza para los datos de la CIC del suelo**

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media de Cuadrados	F0 calculada	F0 tablas 0.1, 3, 12	Conclusión
Entre tratamientos	19.025	3	6.34	<b>1.36</b>	<b>5.95</b>	Se acepta
Error	56.095	12	4.67			
Total	75.120	15				