

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ÁREA ACADÉMICA AGROFORESTAL
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN GESTIÓN DE RECURSOS
NATURALES Y TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN

“Evaluación de la zeolita natural utilizada como una tecnología productiva y limpia, aplicada al pasto Maralfalfa (*Pennisetum sp*) como un complemento en el uso de los fertilizantes nitrogenados”

Trabajo Final de Graduación sometido al Tribunal del Área Académica Agroforestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica para optar por el grado de Magister en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción

Ing. Manuel Francisco Pérez Marín

Campus Cartago, Costa Rica

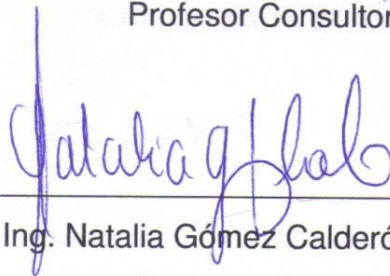
2014

Este Trabajo Final de Graduación fue aceptado por el Tribunal del Área Académica Agroforestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado de Magister en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción.



Ing. Wagner Peña Cordero, Ph.D.

Profesor Consultor



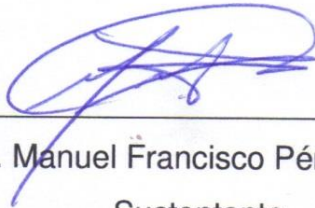
Ing. Natalia Gómez Calderón, M.Sc.

Profesora Lectora



Ing. Rooel Campos Rodríguez, M.G.A.

Presidente del Tribunal



Ing. Manuel Francisco Pérez Marín

Sustentante

DEDICATORIA

A Dios

Este trabajo está realizado con excelencia para Él, pues me ha mantenido con salud, y ha estado a mi lado en cada momento y me ha levantado en mis momentos de desánimo.

A mi madre Paulina Marín G.

Quien desde niño me inculcó los principios y valores para nunca abandonar los estudios. Quien siempre me ha apoyado y ha creído en mí. A quien amo y admiro tanto y que me inspira a ser cada día un mejor profesional y un mejor ser humano.

Manuel Francisco Pérez Marín

AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis el *Ing. Wagner Peña C. Ph.D*, por su valioso conocimiento, aportes y toda la asesoría brindada a lo largo de la investigación.

A los funcionarios del Centro de Investigación, Transferencia Tecnológica y Educación para el Desarrollo (*CITTED-UNED*), en la Perla, San Carlos, por toda la asistencia en las labores de campo.

A mi hermana *Susana Pérez M.* y mi padre *Manuel Pérez P.* por todo el apoyo brindado.

Hago constar mi agradecimiento y reconocimiento a las siguientes instituciones:

Al Ministerio de Ciencia, Tecnología y Telecomunicaciones (*MICITT*) y al Consejo Nacional para Investigaciones Científicas y Tecnológicas (*CONICIT*) por el incentivo económico otorgado para cursar el programa de maestría. Al Instituto Tecnológico de Costa Rica (*ITCR*) por los conocimientos adquiridos a lo largo del plan de estudios y a todo el personal del programa, en especial al *TAE Carlos E. Hernández V.* por su calidez humana. A la Universidad Estatal a Distancia (*UNED*), por el uso de instalaciones y la experiencia adquirida en el desarrollo de la investigación.

A las siguientes personas que de una u otra forma influyeron en la culminación de esta meta: *Alejandra María Alegría, M.Sc.*, por su amistad y apoyo en todo el programa, a todos mis compañeros de clase, que más que compañeros fueron profesores de los que obtuve conocimientos. A mi lectora la *Ing. Natalia Gómez M.Sc.*, por su valioso aporte, a *Mariam Rodríguez Rojas*, por todo su apoyo a lo largo de mi formación profesional. Y a todas aquellas personas que me brindaron su ayuda para la realización del presente trabajo.

Manuel Francisco Pérez Marín

INDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	9
1. INTRODUCCIÓN	10
1.1. INTRODUCCION AL TEMA	10
1.2. OBJETIVOS	12
1.2.1- Objetivo General	12
1.2.2- Objetivos Específicos	12
1.3. JUSTIFICACIÓN	13
1.4. HIPÓTESIS	15
1.4.1- Hipótesis Nula H_0	15
1.4.2- Hipótesis Alternativa H_a	15
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1. FERTILIZANTES NITROGENADOS	16
2.1.1- Urea.....	17
2.1.2- Problemática ambiental de los fertilizantes nitrogenados.....	19
2.1.3- Problemáticas ambientales por el uso de fertilizantes en Costa Rica.....	23
2.2. TÉCNICA ISOTÓPICA CON ^{15}N	25
2.2.1- Trazador ^{15}N	26
2.3. CULTIVO MARALFALFA	27
2.3.1- Origen del pasto	27
2.3.2- Generalidades botánicas.....	27
2.3.3- Características generales.....	29
2.3.4- Ficha técnica	30
2.4. LA ZEOLITA	31
2.4.1- Características generales de la zeolita	32
2.4.2- Estructura de las zeolitas	33
2.4.3- Propiedades	34
2.4.4- Especie Clinoptilolita	35
2.5. IMPACTO EN LOS SUELOS	35
2.5.1- Características edáficas de la región en estudio	37
3. MARCO METODOLOGICO	41
3.1. MARCO ESPACIAL YTEMPORAL	41
3.1.1- Espacial	41
3.1.2- Temporal	42
3.2. TIPO DE INVESTIGACION.....	42
3.2.1- Testigo.....	43

3.2.2-	Tratamientos	43
3.2.3-	Participantes en el proyecto de investigación	44
3.2.4-	Materiales	45
3.2.5-	Procedimiento de trabajo	45
4.	RESULTADOS	50
4.1.	SUELO PARCELA EXPERIMENTAL	50
4.2.	PASTO MARALFALFA	52
5.	DISCUSIÓN	59
5.1.	ANÁLISIS DE SUELOS DE LA PARCELA EXPERIMENTAL	59
5.1.1-	Propiedades químicas del suelo	59
5.1.2-	Relaciones catiónicas del suelo	63
5.2.	ANÁLISIS DEL PASTO MARALFALFA	65
5.2.1-	Crecimiento orthotrópico	65
5.2.2-	Análisis foliar	67
5.2.3-	Aprovechamiento del fertilizante	69
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
6.1.	CONCLUSIONES	70
6.2.	RECOMENDACIONES	71
7.	BIBLIOGRAFÍA	73
8.	ANEXOS	77

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Distribución de la emisión de gases en el sector agropecuario durante el 2000 y 2005	21
Figura 2.	Unidades de construcción de las zeolitas, dos tetraedros $\text{SiO}_4/\text{AlO}_4$	33
Figura 3.	Distritos del cantón de San Carlos de Alajuela	37
Figura 4.	Ubicación de la parcela experimental en los terrenos del CITTED-UNED, La Perla, San Carlos	41
Figura 5.	Distribución espacial de las micro-parcelas	43
Figura 6.	Parcela experimental al inicio del ensayo	46
Figura 7.	Almacenaje y etiquetado de las muestras del suelo	47
Figura 8.	Muestras de Maralfalfa procesadas	48
Figura 9.	Altura de las plantas de Maralfalfa por tratamiento, fertilizadas con urea combinada con zeolita durante tres meses de crecimiento en el CITTED, San Carlos	53
Figura 10.	Nutrición N-P-K (en mg/l) del pasto Maralfalfa durante 3 meses, en CITTED San Carlos	54

NDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación taxonómica del género <i>Pennisetum sp.</i>	28
Cuadro 2. Valor (en %) de los contenidos nutricionales del pasto Maralfalfa	30
Cuadro 3. Clasificación de los suelos para los 13 distritos del cantón de San Carlos y principales cultivos a los cuales se dedican	38
Cuadro 4. Tendencias presentadas en los análisis de suelos de 1295 muestras provenientes de San Carlos.....	39
Cuadro 5. Tendencias encontradas en el análisis de la Acidez y CICE de 1295 muestras de suelo de San Carlos.....	40
Cuadro 6. Dosis total de nitrógeno aplicado	47
Cuadro 7. Dosis de zeolita aplicada.....	47
Cuadro 8. Propiedades químicas del suelo fertilizado con urea combinada con zeolita y cultivado con pasto Maralfalfa en el CITTED, San Carlos.....	50
Cuadro 9. Relaciones catiónicas del complejo del suelo fertilizado con urea combinada con zeolita y cultivado con pasto Maralfalfa en el CITTED, San Carlos	52
Cuadro 10. Altura de las plantas de maralfalfa (promedio por lote) fertilizadas con urea y zeolita a los dos y tres meses de crecimiento	54
Cuadro 11. Nutrición del pasto Maralfalfa a los tres meses de crecimiento y fertilizado con urea combinada con zeolita en el CITTED, San Carlos.....	55
Cuadro 11 (continuación). Nutrición del pasto Maralfalfa a los tres meses de crecimiento y fertilizado con urea combinada con zeolita en el CITTED, San Carlos	56
Cuadro 12. Contenido de N (%) en pasto Maralfalfa derivado de la fertilización mezclada con zeolita (Nddf) y derivado del suelo (Ndds) durante 3 meses de crecimiento sobre un ultisol en el CITTED, San Carlos.....	57
Cuadro 12 (continuación). Contenido de N (%) en pasto Maralfalfa derivado de la fertilización mezclada con zeolita (Nddf) y derivado del suelo (Ndds) durante 3 meses de crecimiento sobre un ultisol en el CITTED, San Carlos	58

INDICE DE ANEXOS

ANEXO I. Países miembros del Acuerdo Regional de Cooperación para la Promoción de la Ciencia y la Tecnología Nuclear en América Latina y el Caribe, ARCAL.....	77
ANEXO II. Ficha técnica del fertilizante nitrogenado urea	78
ANEXO III. Ubicación del Cantón de San Carlos en la provincia de Alajuela.....	79
ANEXO IV. Distritos que se dedican a la ganadería en la Región Huetar Norte, áreas dedicadas al pastoreo unidades de animales por hectárea	80
ANEXO V. Órdenes de suelos en el cantón de San Carlos, Alajuela	81
ANEXO VI. Guía para interpretar un análisis de suelos	82
ANEXO VII. Niveles críticos para la interpretación de análisis de suelos en Costa Rica adaptados a los criterios del MAG y el CATIE	83
ANEXO VIII. Análisis de suelos del INTA. Micro y macro elementos.....	84

ANEXO IX. Análisis de suelos de CAFESA. Nitrógeno total	85
ANEXO X. Análisis foliar del INTA. Químico completo.....	86
ANEXO X (continuación). Análisis foliar del INTA. Químico completo.....	87
ANEXO XI. Resultados de trazador ¹⁵ N, ISOFYS	88
ANEXO XII. Análisis estadístico T Student y prueba de normalidad para interpretación macro y micro elementos de suelos por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e	89
ANEXO XII (continuación). Análisis estadístico T Student y prueba de normalidad para interpretación macro y micro elementos de suelos por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e	90
ANEXO XII (continuación). Análisis estadístico T Student y prueba de normalidad para interpretación macro y micro elementos de suelos por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e	91
ANEXO XIII. Análisis estadístico T Student y prueba de normalidad para interpretación de las relaciones catiónicas de suelos por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e	92
ANEXO XIII (continuación). Análisis estadístico T Student y prueba de normalidad para interpretación de las relaciones catiónicas de suelos por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e	93
ANEXO XIV. Análisis estadístico T Student y prueba de normalidad para la comparación de los tamaños de las plantas obtenidos en los tratamientos 1,2 y 3 Vs el tratamiento zeolita como conjunto por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e	94
ANEXO XV. Análisis estadístico ANDEVA para el químico completo del pasto Maralfalfa, por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e	95
ANEXO XV (continuación). Análisis estadístico ANDEVA para el químico completo del pasto Maralfalfa, por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e	96
ANEXO XV (continuación). Análisis estadístico ANDEVA para el químico completo del pasto Maralfalfa, por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e	97
ANEXO XV (continuación). Análisis estadístico ANDEVA para el químico completo del pasto Maralfalfa, por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e	98
ANEXO XV (continuación). Análisis estadístico ANDEVA para el químico completo del pasto Maralfalfa, por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e	99
ANEXO XVI. Análisis estadístico T Student y prueba de normalidad para la comparación de los macroelementos N-P-K, (tratamientos 1, 2 y 3) Vs el tratamiento zeolita como conjunto (tratamientos 4, 5, 6 y 7) por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e	100
ANEXO XVI (continuación). Análisis estadístico T Student y prueba de normalidad para la comparación de los macroelementos N-P-K, (tratamientos 1, 2 y 3) Vs el tratamiento zeolita como conjunto (tratamientos 4, 5, 6 y 7) por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e	101
ANEXO XVII. Análisis estadístico ANDEVA de los resultados de aprovechamiento del nitrógeno del pasto Maralfalfa, por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e	102

RESUMEN

La necesidad de buscar alternativas para el aprovechamiento de fertilizantes en pastos de alta calidad como Maralfalfa (*Pennisetum sp*), lleva a investigar a la zeolita a modo de tecnología complementaria al programa de fertilización. Países como México, Colombia, Ecuador y Bolivia han utilizado la zeolita de tal forma que sea una alternativa para mejorar la productividad en algunos cultivos así como también las propiedades de los suelos agrícolas. En Costa Rica, el uso de zeolitas se presenta como un complemento de manejo para mejorar la producción de monocultivos intensivos. Se propuso un trabajo de investigación sobre el cultivo Maralfalfa (*Pennisetum sp*), de siete tratamientos por cuatro réplicas como diseño en bloques completos al azar, donde la relación suelo-planta se basa en siete tratamientos de la fertilización, a saber: 1. tratamiento control, sin adición fertilizantes u otro insumo, 2. Manejo solo con 15% de zeolita, 3. Manejo de fertilización solo con urea, 4. Manejo de fertilización con urea y 15% de zeolita, 5. Urea con 25% de zeolita, 6. Urea con 35% de zeolita y 7. Urea con 50% de zeolita, la proporción de zeolita es con respecto a la cantidad utilizada de nitrógeno en forma de urea en el programa de fertilización. Se analizaron las propiedades químicas del suelo, los efectos en la nutrición de la planta, el crecimiento vegetal y la fuente primaria del nitrógeno obtenido por el cultivo, por medio de técnicas isotópicas y la adición del trazador ¹⁵N por dilución. Entre los resultados, destaca el mejoramiento de las propiedades del suelo, especialmente aquellas relacionadas con el complejo de cambio; por otro lado, destaca el aprovechamiento del nitrógeno por la planta proveniente del suelo al menos 90% con respecto al derivado del fertilizante. Se pretende demostrar que el uso de las zeolitas mejora las condiciones de los sistemas agropecuarios y reduce el impacto ambiental negativo causado por las malas prácticas en los programas de fertilización.

Palabras claves: Pasto maralfalfa; Zeolitas; Nitrógeno; Fertilización; Zona Edáfica; Trazador ¹⁵N.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCION AL TEMA

Uno de los grandes retos que enfrenta el sector agro-productivo del país hoy en día, es la reducción del impacto ambiental negativo generado por el uso intensivo de los fertilizantes nitrogenados; pues los productores se enfrentan a pérdidas de más del 50% de este tipo de fertilizante aplicado en el campo (González *et al*, 2007); ya sea por su efecto en volatilización, escorrentía o lixiviación del producto.

En las plantas forrajeras, específicamente en el caso de las gramíneas, el uso del elemento nitrógeno en la fertilización se llega a convertir en el elemento principal, ya que limita el crecimiento, teniendo mayor impacto en la producción de materia seca y calidad de los pastos. El nitrógeno interviene sobre el crecimiento de este tipo de cultivos al controlar el desarrollo y aparición de nuevos brotes, aumentando el número de hojas por planta y con ello la biomasa foliar (Cabalceta, 1999).

Según Acosta (1999), en Costa Rica, en el caso de las gramíneas, se recomienda no exceder los 100 kg/ha en el uso de fertilizantes nitrogenados en una sola aplicación, para prevenir problemas de envenenamiento con nitratos, ya que ocurre cuando los niveles de nitratos (N-NO₃) son mayores al 0.3%. Lo que convierte este tipo de plantas en altos consumidores de nitrógeno.

Aunado a esto, se tiene la deficiencia de nitrógeno que presentan los suelos de uso agrícola, que debido a las características propias del nitrógeno (elemento altamente móvil por su naturaleza química), se pierde fácilmente. Los productores, ante estas pérdidas, recurren en ocasiones a sobredosis de fertilización provocando envenenamiento.

Como posible solución, se han empleado fertilizantes orgánicos como la broza de café, la cachaza, la gallinaza, el estiércol vacuno, entre otros muchos; Los cuales tienen diversos porcentajes de nitrógeno presente, lo que permite una reducción del consumo de los fertilizantes químicos nitrogenados.

No obstante, al introducir un elemento que mejore las condiciones del suelo (a nivel biológico y estructural), y que actúe a su vez como un potenciador de los fertilizantes nitrogenados sin importar su condición química u orgánica; se logra un uso eficiente y óptimo de los ciclos de fertilización en los cultivos. Las zeolitas se presentan como potenciadores, ya que por las condiciones naturales, este mineral se presenta como una posible solución a la problemática ambiental y como un subsanador en los costos de producción, debido a que las zeolitas mejoran las propiedades químicas y físicas del suelo, es uno de los caminos más efectivos para incrementar la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en la zona de las raíces y disminuir las aplicaciones de fertilizantes reduciendo las pérdidas por volatilización y lixiviación de los de los mismos (Osorio *et al*, 2003).

Además, contribuyen ostensiblemente a mejorar la humedad de la capa arable, disminuye la densidad aparente del suelo lo que facilita la fluidez del agua, lográndose un incremento de producción en la cosecha de los cultivos, y sobre todo, reduciéndose el impacto ecológico. La zeolita no actúa como fertilizante, sino como un aditivo que permite incrementar la eficiencia de los fertilizantes, permitiendo una disponibilidad controlada de los cationes que son utilizados por las plantas en su nutrición (Montalvo *et al*, 1991).

1.2. OBJETIVOS

1.2.1- Objetivo General

Valorar el efecto de la zeolita natural en la nutrición del pasto Maralfalfa (*Pennisetum sp*), aplicada como un regulador del consumo de fertilizantes nitrogenados en un suelo ultisol de San Carlos

1.2.2- Objetivos Específicos

1. Determinar el efecto de la zeolita sobre la fertilidad del suelo, mediante la valoración de sus propiedades químicas.
2. Establecer la relación de la fertilización combinada con zeolita y el crecimiento del pasto Maralfalfa a través del isótopo ^{15}N en la nutrición foliar.
3. Cuantificar el nitrógeno marcado derivado del suelo y del fertilizante que ha traslocado a la planta durante el periodo de corta.

1.3. JUSTIFICACIÓN

En las últimas décadas, el incremento en el uso de fertilizantes, ha dado origen a una serie de cambios en el ambiente, produciendo alteraciones físico-químicas así como biológicas. El mercado agroindustrial a nivel global exige altos niveles de productividad y sumado a la carencia natural de nutrientes, hacen indispensable el consumo de los mismos.

En su informe XIII, el Acuerdo Regional de Cooperación para la Promoción de la Ciencia y Tecnología Nucleares en América Latina (ARCAL) menciona que se da una la falta de conocimiento o compromiso entre los productores agrícolas sobre los cuidados necesarios para controlar la contaminación del medio ambiente, mediante un uso más eficiente de las aplicaciones agrícolas.

Los cultivos requieren cantidades importantes de nutrientes para obtener altos rendimientos, siendo el nitrógeno el nutriente que más afecta la calidad y el rendimiento de la planta (FAO, 2008).

Por estas razones, se debe realizar un uso sustentable de los fertilizantes, con el fin de reducir los impactos ambientales negativos generados, tales como la eutrofización de los cuerpos superficiales de agua, degradación de suelos y contaminación de acuíferos; esto, mediante el implemento de nuevas tecnologías, desarrollo de planes de fertilización, nuevas prácticas de gestión que mejoren la producción agrícola al tiempo que evite la degradación del suelo.

El uso de materiales naturales tales como zeolitas, que actúan como un acondicionador del suelo con una capacidad de acción de cambio alto, son excelentes complementos para las aplicaciones agrícolas, ya que permiten la absorción de amonio (NH_4^+), la humedad y micro-macro nutrientes, lo que

reduce el uso de fertilizantes y así como también el consumo de agua en 10% aproximadamente, por medio de los procesos de adsorción / desorción (Mumpton, 1984).

La presente investigación se desarrolla bajo el concepto de tecnología agroindustrial limpia, con la cual se pretende disminuir el consumo de fertilizantes nitrogenados, mejorar las condiciones nutricionales y estructurales de los suelos, disminuyendo a su vez el impacto negativo ambiental que tienen estos insumos. Se plantea un trabajo experimental con pasto maralfalfa y el uso de urea combinada con zeolita, asociado a un proyecto regional (anexo I) y apoyado por la Agencia internacional de Energía Atómica (RLA5062 ARCAL XXV).

1.4. HIPÓTESIS

Diseño experimental de 4 bloques o repeticiones y 7 tratamientos (bloques completos al azar)

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = \mu_6 = \mu_7$$

$$H_a: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4 \neq \mu_5 \neq \mu_6 \neq \mu_7$$

1.4.1- Hipótesis Nula H_0

H_0 : La zeolita no contribuye a un mejor aprovechamiento del fertilizante nitrogenado por parte del pasto Maralfalfa.

1.4.2- Hipótesis Alternativa H_a

H_a : La zeolita contribuye a un mejor aprovechamiento del fertilizante nitrogenado por parte del pasto Maralfalfa.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. FERTILIZANTES NITROGENADOS

El nitrógeno es uno de los elementos de mayor importancia para todos los seres vivos. En su estado puro (N_2) es un gas, inodoro, inerte e insípido. El aire está constituido en un 80% de nitrógeno aproximadamente. En las plantas, el nitrógeno está presente en la composición de numerosas sustancias orgánicas tales como aminoácidos, ácidos nucleicos, proteínas, clorofila, entre otros, sustancias que son la base de los procesos que controlan el desarrollo, el crecimiento y la multiplicación de las mismas. El nitrógeno debe estar formando compuestos a base de combinación con otros macro y micro elementos. En las plantas este elemento es absorbido mediante las raíces en forma de NO_3^- y de NH_4^+ (Meléndez y Molina, 2003).

Los fertilizantes nitrogenados minerales, son sustancias nutritivas que en su composición química tienen nitrógeno en forma asimilable para la planta, es decir que, cuando son aplicados al suelo o a las hojas, pueden ser absorbidos por los diferentes órganos, contribuyendo así a su crecimiento, desarrollo y producción (González *et al*, 2007).

Según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, el elevado consumo de estas sales fertilizantes en el ámbito mundial se debe a que el nitrógeno, junto con el fósforo y el potasio, son los macronutrientes claves para el adecuado crecimiento, desarrollo y producción de las plantas, por lo que son aplicados en grandes cantidades durante todo el ciclo del cultivo. Por otra parte, se da un generalizado faltante de nitrógeno en los suelos a nivel mundial disminuyendo su fertilidad integral, lo que implica una dependencia directa entre el uso de estos productos y los rendimientos deseados, especialmente para aquellos cultivos altamente especializados, como híbridos y transgénicos

Los principales fertilizantes nitrogenados sólidos que se derivan del amoníaco (NH_3) son: la urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), el sulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) y el nitrato de amonio (NH_4NO_3). La urea es el de mayor utilización por su alta concentración de nitrógeno (46 %) y su bajo costo; su forma de presentación es en gránulos o perlas de color blanco que, por acción del agua, se convierten en el suelo en amonio (NH_4^+) y por descomposición microbológica en nitrato (NO_3^-), siendo ambas formas aprovechables por las plantas. La aplicación de este producto, sin embargo, ha evidenciado pérdidas importantes de nitrógeno por volatilización especialmente cuando se maneja una fertilización superficial; razón por la cual, se recomienda el empleo de este producto en cultivos ya establecidos y, preferiblemente, fraccionando el producto en pequeñas dosis.

2.1.1- Urea

Urea, también conocida como carbamida, es el nombre del ácido carbónico de la diamida (anexo II). Es una sustancia nitrogenada, producida por algunos seres vivos como medio de eliminación del amoníaco. En los animales se halla en la sangre, orina, bilis y sudor. La urea se presenta como un sólido cristalino y blanco de forma esférica o granular. Es una sustancia higroscópica, es decir, que tiene la capacidad de absorber agua de la atmósfera, presenta un ligero olor a amoníaco. Comercialmente la urea se presenta en pellets, gránulos, o bien disuelta, dependiendo de la aplicación (Ospina, 2009).

El 90% de la urea producida se emplea como fertilizante. Se aplica al suelo y provee nitrógeno a la planta. Como fertilizante presenta la ventaja de proporcionar un alto contenido de nitrógeno (46% de nitrógeno). El grano se aplica al suelo, el cuál debe estar bien trabajado y ser rico en bacterias. La aplicación puede hacerse en el momento de la siembra o antes. Luego el grano se hidroliza y se descompone. Debe tenerse mucho cuidado en la correcta

aplicación de la urea al suelo. Si ésta es aplicada en la superficie, o si no se incorpora al suelo, ya sea por correcta aplicación, lluvia o riego, el amoníaco se vaporiza y las pérdidas son muy importantes. La carencia de nitrógeno en la planta se manifiesta en una disminución del área foliar y una caída de la actividad fotosintética (Ospina, 2009).

La urea, en su forma original, no contiene amonio (NH_4^+), pero ésta se hidroliza con rapidez por efecto de la enzima ureasa y por la temperatura del suelo. En suelos desnudos y con aplicaciones superficiales de urea, algún porcentaje de amoníaco (NH_3) se pierde por volatilización. La urea, al hidrolizarse produce amonio y bicarbonato, estos segundos reaccionan con la acidez del suelo e incrementan el pH en la zona próxima al sitio de reacción de este fertilizante (banda de aplicación). Una vez que la urea se ha convertido en ion amonio, éste es absorbido por las arcillas y la materia orgánica del suelo y es eventualmente nitrificado o absorbido directamente por las plantas.

2.1.1-1. Usos y recomendaciones de la urea

La urea es la fuente más económica de nitrógeno de alta concentración. Es un fertilizante que tiene una gran variedad de usos y aplicaciones. Es un componente indispensable para producir formulas balanceadas de fertilización. Se puede aplicar al suelo directamente como mono producto, se puede incorporar a mezclas físicas balanceadas, y por su alta solubilidad en agua, puede funcionar como aporte de nitrógeno en formulas a base de NPK en forma foliar, para uso en fertirriego altamente solubles y en fertilizantes líquidos (Isquisa, 2013).

2.1.1-2. Compatibilidad y estabilidad en almacenamiento de la urea

La urea es compatible con la mayoría de los fertilizantes, sin embargo existe una compatibilidad limitada con el fertilizante superfosfato triple (SPT) y con el superfosfato simple (SPS) (Isquiza, 2013). En mezclas físicas que no se envían a almacenamiento, porque son producidas para su aplicación inmediata, es posible mezclarlos, ya que al aplicarse rápidamente se evita la reacción de la urea y con estos fosfatos poco compatibles. Además, es incompatible con productos a base de nitrato de amonio, ya que la mezcla de ambos tiene una reacción inmediata aún en condiciones de bajos niveles de humedad relativa.

Según la misma cita, Es de mucha importancia asegurar las mejores condiciones ambientales durante su almacenamiento, es decir, se debe contar con un lugar seco, fresco, ventilado y libre de cualquier agente contaminante, utilizando “tarimas” o “camas” para el acomodo en el caso de productos envasados, los cuales no deben ser de madera, es decir, no deben ser materiales absorbentes. Todo esto en concordancia al manejo eficiente de bodegas solicitado dentro de las buenas prácticas agrícolas.

2.1.2- Problemática ambiental de los fertilizantes nitrogenados

Uno de los riesgos de la agricultura intensiva es, que, parte del nitrógeno aplicado se puede perder, yendo a parar a las reservas acuáticas y atmosféricas. Del nitrógeno aplicado a muchos cultivos, solamente un 10-50% suele ser absorbido por las plantas, mientras que el 50-90% restante es susceptible de lixiviarse a las aguas subterráneas y superficiales, produciendo su eutrofización, evidenciada en canales, lagos o represas por medio de vegetación muy verde, o de perderse en forma gaseosa (González *et al*, 2007).

Según el mismo autor, lo que respecta a las pérdidas por lixiviación, se da una notable relación entre la cantidad de las sales nitrogenadas empleadas en la agricultura intensiva y la contaminación de los mantos acuíferos por nitratos. Esto ha hecho que la legislación haya obligado a la declaración de zonas vulnerables a la contaminación por nitratos, donde se controla expresamente la cantidad de fertilizante aplicado a los cultivos, con sanciones a los agricultores en caso de sobrepasar las dosis recomendadas. En Costa Rica el Ministerio de Ganadería y Agricultura regula estas dosis por cultivo.

En cuanto a las pérdidas gaseosas, se calcula que la agricultura es la responsable de aproximadamente dos tercios de la emisión total de amoníaco (NH_3) a la atmósfera, de más de un tercio de las emisiones del óxido nitroso (N_2O), y de alrededor de un cuarto de las emisiones de óxido nítrico (NO). Estos gases tienen numerosos efectos negativos sobre el medio ambiente como la eutrofización de ecosistemas una vez depositados en forma seca o húmeda (NH_3 y NO), la producción de ozono troposférico (NO), la disminución del ozono estratosférico (N_2O) y el calentamiento global de la atmósfera (N_2O). En concreto, se calcula que la agricultura contribuye en, cerca de un 80% a las emisiones antropogénicas de N_2O y en aproximadamente un 40% a sus emisiones globales (figura 1). Aunque cabe aclarar que, según Montenegro (2003), en el contexto agropecuario costarricense estas emisiones varían de acuerdo a las condiciones de manejo.

Según el inventario nacional de gases de efecto invernadero, en Costa Rica, el N_2O en su gran mayoría (85%) durante el 2000 se emitió en los suelos dedicados a cultivos agrícolas y pasturas, siendo estos últimos los responsables de la mayor proporción (71%) de la emisión. La quema de los residuos agrícolas en el campo generó el 10% de este gas, y la quema de pasturas el 5%. Durante el 2005 la proporción generada de este gas se mantuvieron similares entre las mismas fuentes (figura 1).

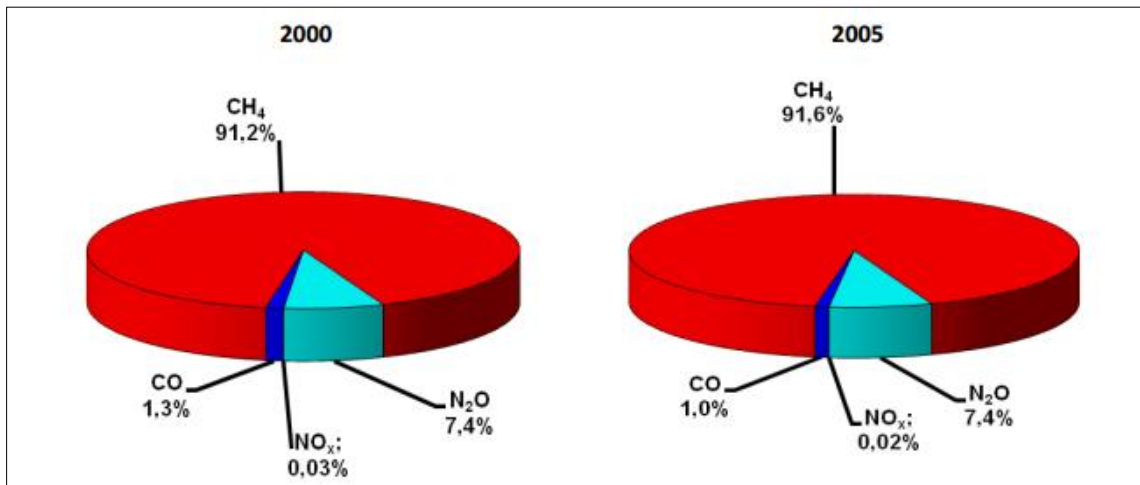


Figura 1. Distribución de la emisión de gases en el sector agropecuario durante el 2000 y 2005

Fuente: Chacón *et al*, 2009

Al contrario que el NH_3 y el NO , el N_2O es estable en la troposfera y tiene un tiempo de permanencia en la atmósfera mayor de 100 años, de forma que su efecto relativo como gas invernadero es unas 150 veces superior al del dióxido de carbono (CO_2). Por lo tanto las implicaciones del N_2O producido por la agricultura moderna, tanto como gas invernadero como en la destrucción de la capa de ozono estratosférico, durarán durante varias generaciones futuras (González *et al*, 2007).

Sobre las posibles estrategias para la mitigación de la contaminación de las aguas subterráneas por nitratos y las emisiones de gases nitrogenados a la atmósfera, el desafío es ajustar el aporte de fertilizante a la demanda del cultivo. Así, las estrategias que favorezcan una mayor eficiencia en la asimilación del nitrógeno por el cultivo, reducirían la cantidad que podría ser potencialmente lixiviado a los acuíferos o emitido a la atmósfera.

En este sentido, el reto para la comunidad científica es afrontar el problema mediante el desarrollo de prácticas agrícolas mejoradas que puedan ser

adoptadas por los agricultores. Esto se podría conseguir, siempre que fuera factible, mediante:

- La adopción de prácticas de mínimo laboreo que reduzcan la tasa de mineralización de la materia orgánica del suelo,
- La rotación de cultivos y el uso de cultivos intercalares que reciclaran el N más eficientemente,
- Una estrategia de fertilización flexible (cantidad, fraccionamiento) basada en la producción estimada mediante modelos que incorporen la predicción de la precipitación para la época de crecimiento del cultivo,
- El desarrollo de fertilizantes o productos asequibles económicamente que reduzcan la nitrificación o aumenten la retención del nitrógeno en la zona radicular,
- El aumento de la demanda de N por la planta mediante la abolición de los impedimentos al desarrollo de las raíces,
- El desarrollo de nuevos cultivares de plantas que aumenten la captura de agua y nutrientes,
- El desarrollo de sistemas de apoyo a la decisión de la fertilización basados en información sobre el cultivo y el suelo y que pueda ser adquirida rápidamente y de forma barata, y
- La agricultura de precisión con tecnología que facilite la aplicación de dosis variables de semillas y fertilizantes según las necesidades.

La aplicación de todas estas estrategias no sólo influye en la reducción de la contaminación de las aguas y de la atmósfera, sino que intrínsecamente conlleva también un efecto sobre la producción y la calidad de los productos vegetales obtenidos.

2.1.3- Problemáticas ambientales por el uso de fertilizantes en Costa Rica

Los sistemas agropecuarios hoy en día se encuentran en una constante búsqueda de nuevas tecnologías que permitan no solo mejorar la eficiencia en la producción, sino también, que estas tecnologías reduzcan el impacto negativo que tienen sobre el componente ambiental y social.

Según el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), las buenas prácticas agropecuarias de Costa Rica tienen como propósito establecer las pautas generales básicas que se deben aplicar en la producción agropecuaria, para minimizar los riesgos de degradación del ambiente y de contaminación física, química y biológica de los productos agropecuarios, especialmente de aquellos cuyo consumo es en fresco y el encargado por ley de velar por el cumplimiento es el servicio fitosanitario del estado (SFA), ley 7664 de 1997.

El agua subterránea se contamina fundamentalmente por la presencia de nitratos. En todos los países el agua subterránea es una reserva importante de agua potable. En varias zonas, este recurso hídrico está contaminado hasta el punto de que ya no reúne las condiciones establecidas en las normas actuales para el consumo humano. La importancia de la protección del recurso hídrico radica en que su uso de mayor importancia es el destinado para el consumo humano, por lo que la degradación de las reservas de agua tiene incidencia directa en la salud pública (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 1997).

Relacionado a lo anterior, Costa Rica ya cuenta con una nueva Ley para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico, administrada por la Dirección General del Agua DINA como un órgano técnico adscrito al Ministerio de Ambiente y Energía MINAE. La cual entre otras, procura la protección absoluta de los acuíferos, lo que incluye la contaminación difusa por sales nitrogenadas.

Ante este panorama, en el país está confirmada la contaminación (por presencia de nitratos provenientes de actividades agrícolas), de los Acueductos de Milano, el Cairo y Luisiana, en la región Huetar Atlántica. Lo que ha provocado que las siguientes Instituciones y Ministerios deban encontrar los focos de contaminación, determinar las causas para elaborar un plan remedial:

- Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones,
- Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo,
- Ministerio de Agricultura y Ganadería,
- Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados,
- Ministerio de Salud,
- Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria,
- Servicio Nacional de Aguas Subterráneas Riego y Avenamiento ,
- Servicio Fitosanitaria del Estado.

Así mismo, el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados tiene previsto realizar en un plazo de dos años, estudios de contaminación por fertilizantes nitrogenados en las siguientes regiones:

- Acuífero de Barva,
- Acuífero de la Libertad,
- Acuífero de Colima,
- Acueductos de Banderillas de Cartago,
- Cuenca del Río Naranjito en Quepos, Cuenca de Río Jiménez,
- Río Santa Clara, Molino,
- Microcuencas de las quebradas de Pacayas y Plantón,
- Parte Alta del Río Reventazón,
- Arrecifes Coralinos de la Zona Atlántica,

- Humedales Térraba- Sierpe y Caño Negro,
- San Carlos, Guácimo, Cariari y Banderillas.

De la misma manera que el recurso hídrico se ve afectado por el uso de las sales nitrogenadas por la lixiviación y escorrentía, la volatilización del nitrógeno genera también problemas ambientales en el país, tal es el caso del aumento en la huella de carbono, situación que se opone a la meta de Costa Rica en miras a lograr la carbono neutralidad; por lo que se hacen necesarios los inventarios de gases de efecto de invernadero y los programas de cambio climático impulsados por el MINAE.

2.2. TÉCNICA ISOTÓPICA CON ^{15}N

Desde la Revolución Verde, la utilización de fertilizantes en la agricultura tuvo como resultado un ostensible aumento en la producción de los cultivos. Optimizar el uso de los fertilizantes implica disponer de medidas cuantitativas que den cuenta de los distintos factores que inciden en un cultivo.

La utilización de trazadores permite evaluar un fertilizante y, además, determinar la forma más adecuada para aplicarlo, según el contexto en el cual se esté aplicando (clima, suelo, cultivo) (Peña *et al*, 2002).

El método isotópico es un método directo. Consiste en introducir un isótopo en un fertilizante para marcarlo, incorporar el fertilizante en el suelo y medir el efecto de la fertilización sobre la absorción de nutrientes.

Por ejemplo, se puede marcar un fertilizante nitrogenado con el isótopo estable ^{15}N . Su masa atómica difiere levemente del átomo más abundante que es ^{14}N y, por lo tanto, necesita sistemas de detección más elaborados. Los isótopos estables, como su nombre indica, son estables, y no emiten radiaciones, por lo

que su estudio no conlleva ningún riesgo para la salud, aunque durante las mediciones se utilizan algunos gases de referencia que en concentraciones elevadas pueden ser muy peligrosos (Peña *et al*, 2002).

2.2.1- Trazador ^{15}N

El nitrógeno atmosférico está formado, en un 99,634 %, de ^{14}N y en 0,386 % de ^{15}N . Es decir, por cada átomo de ^{15}N existen 272 átomos de ^{14}N . Esta relación se mantiene en los compuestos naturales que contienen nitrógeno. En consecuencia, un fertilizante enriquecido con ^{15}N y absorbido por la planta, arrojará una relación $^{15}\text{N}/\text{N-total}$ superior a la que existe en la atmósfera.

A su vez, una disminución del % del exceso de ^{15}N indica que la planta absorbió nitrógeno desde otras fuentes disponibles, pero no marcadas. El fertilizante marcado puede ser urea, sulfato de amonio o nitrato de sodio. La relación $^{15}\text{N}/\text{N-total}$, de cualquier material, se expresa en abundancia de ^{15}N en átomos (%) o, simplemente, porcentaje de abundancia de ^{15}N y se mide directamente por espectrometría de emisión o espectrometría de masas. Se requiere restar el porcentaje de abundancia natural de ^{15}N que es 0,366 átomos % de ^{15}N (Agencia Internacional de Energía Atómica. IAEA, 1983). Así se obtiene el % de átomos de ^{15}N en exceso, de cualquier material enriquecido.

% NddF = Porcentaje de nitrógeno derivado del fertilizante

$$\% \text{ NddF} = \frac{\text{át.}\%^{15}\text{N exceso en la muestra} - 0.366}{\text{át.}\%^{15}\text{N exceso en el fertilizante} - 0.366} \times 100 \quad \text{Ecuación (1)}$$

% NddS = Porcentaje de nitrógeno derivado del suelo

$$\% \text{ Ndds} = 100 - \% \text{ Nddf} \quad \text{Ecuación (2)}$$

2.3. CULTIVO MARALFALFA

2.3.1- Origen del pasto

El origen del pasto Maralfalfa (*Pennisetum* sp) es por hoy muy incierto. Varios autores mencionan que el origen se presume de Colombia. Creado por el Padre José Bernal Restrepo Sacerdote Jesuita, Biólogo Genetista nacido en Medellín el 27 de Noviembre de 1908.

El 4 de Octubre de 1965 el Padre José Bernal, utilizando su sistema químico biológico S.Q.B. cruzó el pasto Elefante Napier (*Pennisetum Purpureum*), originado del África, y la Grama Paspalumy obteniendo una variedad que denominó Gramafante. Posteriormente, el 30 de Junio de 1969, Utilizando el mismo Sistema Químico Biológico S.Q.B, cruzó los pastos Gramafante (Elefante y Grama) y el pasto llamado Guaratara (*Axonopus Purpussi*), originario del llano Colombiano y obtuvo la variedad que denominó Maravilla o Grama tara. A partir de allí el Padre Bernal, utilizando nuevamente su sistema S.Q.B. cruzó el pasto Maravilla o Grama tara y la Alfalfa Peruana (*Medicago Sativa* Linn) con el pasto Brasileiro (*Phalaris Azudinacea* Linn); y el pasto resultante lo denominó “Maralfalfa” (Brenes, 2009).

Este híbrido es estéril por lo que para obtener híbridos fértiles se ha utilizado Colchicina con lo que duplica el número de cromosomas y se obtiene un híbrido hexaploide fértil. (Correa et al 2002).

2.3.2- Generalidades botánicas

Clasificación taxonómica del género *Pennisetum*:

Familia: Poaceae

Sub-familia: Panicoideae

Clase: Angiospermae

Reino: Gramínea

Género: *Pennisetum*

Especie: *sp*

Cuadro 1. Clasificación taxonómica del género *Pennisetum sp*

Familia	Sub-familias	Tribus	Géneros	Especies
<i>Poaceae</i>	<i>Pooideae</i>			
	<i>Chloridoideae</i>			
	<i>Oryzoideae</i>			
	<i>Bambusoideae</i>			
	<i>Panicoideae</i>	<i>Andropogoneae</i>		
		<i>Festuceae</i>		
		<i>Hordeaeae</i>		
		<i>Angrostideae</i>		
		<i>Paniceae</i>	<i>Axonopus</i>	
			<i>Brachiaria</i>	
		<i>Cenchrus</i>		
		<i>Digitaria</i>		
		<i>Echinochloa</i>		
		<i>Melinis</i>		
		<i>Paricum</i>		
		<i>Paspalidium</i>		
		<i>Paspalum</i>		
		<i>Pennisetum</i>	<i>americanum</i>	
			<i>purpureum</i>	
			<i>dandestinum</i>	
			<i>typhoides</i>	
			<i>violaceum</i>	
			<i>vifosum</i>	

Fuente: (Ramirez *et al*, 2006)

Especie perenne alta, crece en matorros, los tallos pueden alcanzar de 2 a 3 centímetros de diámetro y alturas de dos a tres metros y hasta cuatro metros si se le deja envejecer.

Las raíces del pasto Maralfalfa son fibrosas y forman raíces adventicias que surgen de los nudos inferiores de las cañas, son de crecimiento rápido y de alta capacidad de profundizar en el suelo. Estas cañas conforman el tallo superficial el cual está compuesto por entrenudos, delimitados entre sí, por nudos. Los entrenudos en la base del tallo son muy cortos, mientras que los de la parte

superior del tallo son más largos. Los tallos no poseen vellosidades. Las ramificaciones se producen a partir de los nudos y surgen siempre a partir de una yema situada entre la vaina y la caña. La vaina de la hoja surge de un nudo de la caña cubriéndola de manera ceñida. Los bordes de la vaina están generalmente libres y se traslapan. Es común encontrar bordes pilosos, siendo esta una característica importante en su clasificación. La lígula, que corresponde al punto de encuentro de la vaina con el limbo, se presenta en corona de pelos. Mientras que la longitud y el ancho de las hojas pueden variar ampliamente dentro de una misma planta. La presencia de pelos en el borde de las hojas, es otro elemento fundamental en la descripción de esta especie (Correa *et al*, 2002).

2.3.3- Características generales según Cunuhay y Choloquina, (2011):

- El crecimiento es casi el doble de otros pastos. Es suave.
- La Maralfalfa es altamente palatable y dulce, más que la caña forrajera, sustituye la Melaza.
- En zonas con suelos pobres en materia orgánica, que van de franco-arcillosos a franco-arenosos, en un clima relativamente seco, con pH de 4,5 a 5 a una altura aproximada de 1.750 m.s.n.m. y en lotes de tercer corte, se han obtenido cosechas a los 75 días con una producción promedio de 28,5 kilos por metro cuadrado, es decir, 285 toneladas por hectárea, con una altura promedio por caña de 2,50 metros.
- Posee altos valores en los contenidos nutricionales respecto a otros pastos forrajeros (cuadro 2).

Cuadro 2. Valor (en %) de los contenidos nutricionales del pasto Maralfalfa

Humedad	79,33
Cenizas	13,50
Fibra	53,33
Grasa	21,00
Carbohidratos solubles	12,20
Proteínas crudas	16,25
Nitrógeno	26,00
Calcio	0,80
Magnesio	0,29
Fósforo	0,33
Potasio	3,38
Proteínas digestibles	7,43
Total nitrógeno digestible	63,53

Fuente: Adaptado de Cunuhay y Choloquina, 2011

2.3.4- Ficha técnica

La Maralfalfa (*Pennisetum* sp) es una variedad de pasto dulce, con los siguientes datos técnicos (Cunuhay y Choloquina, 2011):

- Condiciones Agroclimáticas:
 - Se da en alturas comprendidas desde el nivel del mar hasta 3000 m.s.n.m.
 - Se adapta bien a suelos con fertilidad media alta.
 - Su mejor desarrollo se obtiene en suelos con buen contenido de materia orgánica y buen drenaje.
- Temperatura:
 - De 25 a 30°C
- Rendimiento:
 - Se han cosechado entre 28 kg y 44 kg por metro cuadrado, dependiendo del manejo del cultivo.
 - Tiene un 12% de carbohidratos azúcares, etc. Por lo que hace de este pasto un alimento apetecido por los animales herbívoros.

- Cantidad de semilla por hectárea de aproximadamente 4000 (cuatro mil) Kilos.
- Siembra:
 - La distancia recomendada para sembrar la semilla, es de 50 cm. entre surcos; y 2 cañas paralelas a máximo 3 cm. de profundidad.
- Altura:
 - A los 90 días alcanza alturas hasta de 4 metros de acuerdo con la fertilización y cantidad de materia orgánica aplicada.
- Corte:
 - Para el primer corte se debe dejar espigar todo el cultivo (90 días), los siguientes cortes se realizan cuando la planta tenga 10% de espigamiento, aproximadamente a los 40 días posteriores a cada corte.
- Fertilización:
 - Responde muy bien a la aplicación de materia orgánica y a la humedad sin encharcamiento, después de cada corte se recomienda aplicar por hectárea un saco de urea y un bulto de cloruro de potasio.
- Uso:
 - Para el ganado de leche se puede dar fresco, es preferible dejarlo secar por uno o dos días antes de picarlo. Para el ganado de ceba recomendarlo seco, fresco o ensilado.

2.4. LA ZEOLITA

Las zeolitas se definen como minerales aluminosilicatos micro porosos que se destacan por su capacidad de hidratarse y deshidratarse reversiblemente.

El término zeolita fue acuñado originalmente en 1756 por el mineralogista sueco Axel Fredrik Cronstedt, quien observó que al calentar rápidamente estilbita, se

producen grandes cantidades de vapor de agua que había sido adsorbida por el material. Con base en esto, llamó zeolita al material, donde el ζέω griego (zeo) significa "hervir" y λίθος (lithos) significa "piedra" (Chaunan, 2013). Las zeolitas naturales ocurren tanto en rocas sedimentarias, como volcánicas y metamórficas.

2.4.1- Características generales de la zeolita, según Haro (2011):

- Mejora las características físicas, químicas y biológicas del suelo, gracias a un efecto de agregación de sus partículas y al aporte de micronutrientes naturales.
- Incrementa la capacidad de intercambio catiónico del suelo.
- Aumenta la retención de fertilizantes y humedad del suelo, lo que permite reducir los volúmenes de dichos materiales y el estrés del cultivo en la época seca.
- Incrementa los niveles en el suelo de fósforo, calcio, potasio y magnesio entre otros, más allá de lo que él mismo aporta, evitando problemas de fijación y optimizando las concentraciones de los mismos en el suelo y en los fertilizantes adicionados al suelo.
- Tiene un efecto centralizador del pH, reduce la acidez del suelo y los excesos de hierro y aluminio.
- Aumenta la tolerancia natural de las plantas a plagas y enfermedades, al permitir una nutrición completa y equilibrada, que mantiene al cultivo en estado de proteosíntesis.
- Su efecto de liberación lenta y continua, hace que el producto trabaje por un largo periodo de tiempo, sin pérdidas por lavado y con un aprovechamiento de hasta un 96%.
- Incrementa el contenido nutritivo de los alimentos, tanto de origen animal como vegetal.

2.4.2- Estructura química de las zeolitas

Las zeolitas tienen una estructura química bastante sólida, es tetraédrica conectada a base de sílica. Esta posee canales y jaulas lo suficientemente grandes que contienen estructuras adicionales de cationes que permiten recibir y absorber varias moléculas que van desde agua hasta compuestos orgánicos complejos sin alterar su estructura cristalina

Las unidades de construcción primarias de las zeolitas son los tetraedros $[\text{SiO}_4]_4^-$ y $[\text{AlO}_4]_5^-$ unidos por compartición de vértices, formando puentes de oxígeno lineales (figura 2) (Vizcaino, 1998).

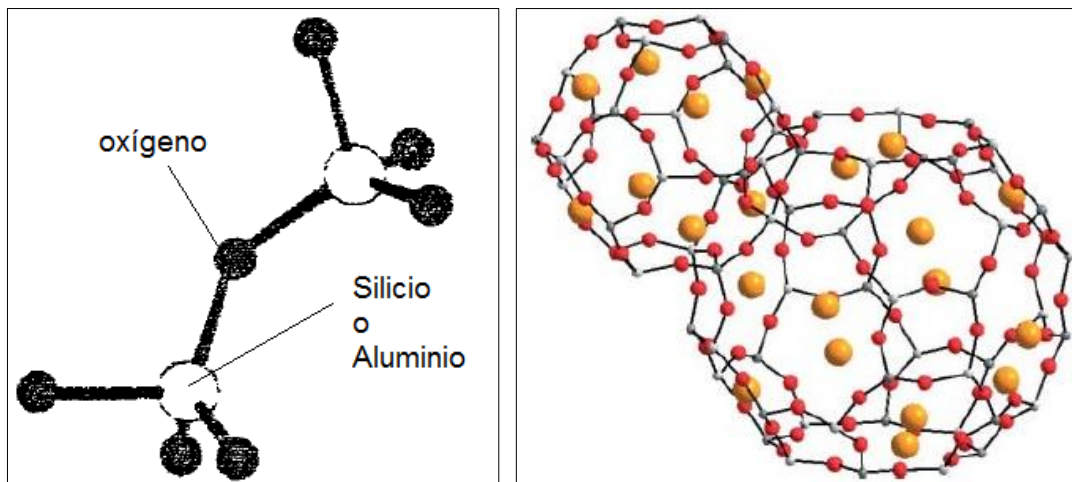


Figura 2. Unidades de construcción de las zeolitas, dos tetraedros $\text{SiO}_4/\text{AlO}_4$
Fuente: (Vizcaino, 1998).

Los tetraedros silicio-oxígeno son eléctricamente neutros cuando se conectan entre sí en un retículo tridimensional como el cuarzo, el SiO_2 . Sin embargo la sustitución de Si (IV) por Al (III) en tal estructura, crea un desequilibrio eléctrico, y para preservar la neutralidad eléctrica total es necesario equilibrar cada tetraedro de $[\text{AlO}_4]$ con carga positiva. Esta la proporcionan los cationes intercambiables, que se sostienen electrostáticamente dentro de la zeolita.

2.4.3- Propiedades

Su propiedad más importante es la de servir de tamiz molecular. Debido a su estructura cavernosa asegura una enorme área en su interior, pero el paso a las mismas está limitado sólo a moléculas con un tamaño determinado que pueden pasar a través del tamiz. El volumen vacío en algunas zeolitas puede alcanzar valores tan altos como un 47% (chabazitas), mientras que las dimensiones de los canales, en las distintas especies minerales de zeolitas, permiten el paso de moléculas con diámetros específicos efectivos de varios angstroms, las cuales son absorbidas en los espacios vacíos; esto explica el empleo de algunas zeolitas como absorbentes industriales.

La capacidad de intercambio iónico es una de sus notables propiedades que han coadyuvado a la difusión de su empleo; oscila entre 0,55 y 3,10 meq/ g. El intercambio iónico está dado por poseer una geometría molecular bien definida, con poros generalmente llenos de agua y cuyos enlaces forman canales y cavidades que le permiten ganar y perder agua reversiblemente e intercambiar los cationes de su estructura, sin que ésta se altere. Su propiedad absorbente le permite un sin número de posibilidades de uso, principalmente en la agricultura, ya que al deshidratarse su volumen está constituido por hasta un 50% de espacio poroso, lo cual le confiere una alta capacidad de absorción a baja presión; la hidratación también es una propiedad de gran importancia, ya que la deshidratarse estos minerales no cambian su estructura, pudiendo llenarse con líquidos o gases repetidos. Otra propiedad importante es su alto contenido silíceo (González, 2012).

Por otra parte, son resistentes a la pulverización, tienen baja resistencia a la abrasión y no se aterronan. Presentan una gran resistencia térmica y a la acción de agentes químicos, así como una gran capacidad y selectividad para cationes de magnesio, calcio, amonio, cesio, estroncio, plata, cobre, níquel, zinc

y otros cationes metálicos. La zeolita natural utilizada por su mayor capacidad de intercambio iónico para la mayoría de experimentaciones ha sido de la familia clinoptilolita.

2.4.4- Especie Clinoptilolita

Es el mineral que se encuentra de forma mayoritaria de las rocas zeolíticas. La clinoptilolita es una zeolita rica en silicio, con una relación de sílice – alúmina ($\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$) que fluctúa entre 8,5 y 10,5 y posee un diámetro de entrada en los poros de 4Å. La estabilidad técnica depende, en gran medida, en su composición química (350 -700 °C).

Entre las singulares propiedades de la clinoptilolita, se tienen: la resistencia a altas temperaturas, medios corrosivos y a irradiación ionizante, su selectividad a cationes grandes de álcalis, tierra alcalina y algunos metales pesados, su capacidad absorbentes y el efecto de cribado por acción molecular, tanto en la industria como en la agricultura (Chaunan, 2013).

La clinoptilolita, como otras zeolitas, tiene una estructura similar a una jaula, consistiendo en tetraedros de SiO_4 y AlO_4 unidos por átomos de oxígeno compartidos. Las cargas negativas de las unidades de AlO_4 se equilibran con la presencia de cationes intercambiables, notablemente calcio, magnesio, sodio, potasio y hierro.

2.5. IMPACTO EN LOS SUELOS

El suelo, como componente importante de los cultivos se ve a menudo degradado por las prácticas realizadas por los agricultores, muchos de los cuales no se preocupan por la conservación en el momento de la preparación del suelo y en el mantenimiento de los cultivos. Esta situación tiene graves

repercusiones ya que la estructura del suelo se ve afectada llegando a niveles críticos de degradación, traduciéndose en pérdidas económicas para los productores, por lo cual se hace necesario realizar investigaciones para obtener información que permita la recuperación de los suelos. La degradación que presentan los suelos agrícolas es un proceso inevitable, se da de manera natural o inducida por la actividad humana, y constituye en la reducción o destrucción de las características biológicas de los recursos naturales, causada por un uso inadecuado de los mismos. Entre los factores antropogénicos que favorecen la degradación de la tierra está la sobre explotación de los recursos, la expansión demográfica, la expansión de las actividades agrícolas y ganaderas, que a su vez implica un uso indiscriminado de las sales fertilizantes (Gorki *et al*, 2009).

Al emplear las zeolitas, éstas mejoran las propiedades físicas y químicas del suelo, ya que incrementa la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en la zona radicular de los sistemas vegetativos, y a su vez contribuye a disminuir las aplicaciones de agroquímicos, tales como las sales nitrogenadas, evitándose así los impactos causados por la volatilización y lixiviación de estos fertilizantes. La textura de los suelo es un factor importante en relación con la lixiviación. Cuanto más fina sea la textura más capacidad de retención presentarán. La cantidad de nitratos que se lixivian hacia el subsuelo depende del régimen de pluviosidad y del tipo del suelo. La mayoría de los suelos poseen abundantes partículas coloidales, tanto orgánicas como inorgánicas, cargadas negativamente, con lo que repelerán a los aniones, y como consecuencia, estos suelos lixiviarán con facilidad a los nitratos. Por el contrario, muchos suelos tropicales adquieren carga positiva y por tanto, manifiestan una fuerte retención para los nitratos. (Coello y Osorio, 2003).

Además el uso de las zeolitas mejora las condiciones de humedad de los suelos sobre todo en la capa arable, ya que se facilita la fluidez del agua, reduce la

densidad aparente ρ_a , lo que contribuye a alcanzar niveles de producción óptimos, elevando la cosecha obtenida de los cultivos. Se debe tener en cuenta que las zeolitas no son fertilizantes, son acondicionadores de los suelos, que permiten potenciar la fertilidad natural de la tierra, mediante una efectiva disponibilidad controlada de los cationes que son empleados por los cultivos para su nutrición (Montalvo *et al*, 1991).

2.5.1- Características edáficas de la región en estudio

El cantón de San Carlos, localizado en la provincia de Alajuela (anexo III), ocupa el 34,32% del territorio de la provincia de Alajuela y el 6,55% del territorio nacional. Está constituido por 13 distritos (figura 3), entre los cuales Ciudad Quesada, Florencia y Aguas Zarcas destacan como los más densamente poblados y urbanizados. Se encuentran suelos, que por sus características se clasifican en los órdenes Inceptisol (subordenes Tropel, Tropept, Andept, Aquept), Ultisol (sub-orden Humult) y Entisol (sub-ordenes Orthent, Aquent) (ITCR, 2000).



Figura 3. Distritos del cantón de San Carlos de Alajuela
Fuente: (ITCR, 2000)

Geológicamente la región de San Carlos está constituido por materiales de los períodos Terciario y Cuaternario; siendo estos últimos los que predominan y presentando dos unidades geomorfológicas: sedimentación aluvial y de origen volcánico. En el cuadro 3, se puede observar los principales Órdenes de suelos según el distrito, además de los principales cultivos a los cuales son dedicados estos suelos.

Cuadro 3. Clasificación de los suelos para los 13 distritos del cantón de San Carlos y principales cultivos a los cuales se dedican

Distrito	Tipo de suelo	Orden	Principales cultivos
Florencia	Typic Dystrudepts Fluventic Eutrudepts	Inceptisoles	Piña, pastos, reforestación, raíces, piña.
Pital	Typic Haplohumults Andic Haplohumults Andic Dystrudepts	Ultisoles Inceptisoles	Piña, pastos, reforestación, raíces y tubérculos.
Aguas Zarcas	Lithic Hapludands Typic Hapludands	Andisoles	Café, hortalizas, pastos, reforestación, piña.
Ciudad Quesada	Andic Dystrudepts Andic Haplohumults	Inceptisoles Ultisoles	Caña de azúcar, café, piña, pastos, raíces.
La Palmera	Typic Hapludults	Ultisoles	Pastos, granos básicos.
Venecia	Typic Hapludands Andic Dystrudepts	Andisoles Inceptisoles	Piña, café, pastos, reforestación.
La Fortuna	Typic Rhodudults Typic Hapludalts Typic Hapludands	Ultisoles Alfisol Andisoles	Piña, arroz, pastos, reforestación, plátano, frutales, raíces.
Buena Vista	Typic Hapludans Andic Haplohumults	Andisoles Ultisoles	Frutales, caña, pastos, reforestación.
Monterrey	Typic Hapludands Andic Dystrudepts	Andisoles Inceptisoles	Pastos, reforestación, raíces y tubérculos.
Venado	Fluventic Eutrudepts Typic Rhodudults Typic Hapludalfs	Inceptisoles Ultisoles Alfisol	Pastos, reforestación.
La Tigra	Andic Dystrudepts Typic Haplohumults	Inceptisoles Ultisoles	Ornamentales, plátano, reforestación, pastos.
Pocosol	Typic Rhodudults	Ultisoles	Pastos, granos básicos.
Cutris	Typic Rhodudults	Ultisoles	Pastos, reforestación.

Fuente: (UNED, 2008)

Según el estudio de Rodríguez (2005), en el cantón de San Carlos, la principal actividad en la zona es la ganadería de leche, de la cual se obtiene cerca del 65% de la producida en todo el país. Esta actividad conlleva a la conversión de los terrenos en pastizales para la alimentación del ganado (anexo IV), y en muchos casos al sobrepastoreo del terreno que deja como resultado la compactación del suelo y la pérdida de características físicas deseables en el mismo. Existen otras actividades pecuarias de gran importancia en la región, como lo son la crianza de cerdos de aves y de tilapias, que si bien no ocupan la cantidad de terreno de la ganadería bovina, siguen teniendo un impacto ambiental.

La mayor cantidad de suelos están conformados por Inceptisoles y Ultisoles (anexo V), que son utilizados principalmente para la producción de piña, tubérculos, reforestación y pastos. Actualmente, la piña, raíces y musáceas son los cultivos que han tenido mayor fortaleza en la región, aunado a la ganadería que cambió de doble propósito a la producción de leche. En el estudio de Bertsch (1995), se analizaron 1295 muestras de suelos, en cuanto a propiedades físicas y químicas. Dichos resultados se resumen porcentualmente en el siguiente cuadro.

Cuadro 4. Tendencias presentadas en los análisis de suelos de 1295 muestras provenientes de San Carlos

Nutrimiento	Tendencias
Fósforo (P)	Más de un 90% de frecuencia de deficiencia de P soluble ($\leq 10 \mu\text{g/ml}$)
Manganeso (Mn) y Hierro (Fe)	64% niveles medios en Mn y 63% niveles medios de Fe
Hierro (Fe)	Menos de un 25% de deficiencia de Fe
Potasio (K)	29% de frecuencia con deficiencia ($\leq 0,2 \text{ meq/100 ml}$)
Calcio (Ca) y Magnesio (Mg)	45% de frecuencia con deficiencia de Ca y 37 % en Mg
Zinc (Zn)	85% de frecuencia con nivel medio ($2,1-10 \mu\text{g/ml}$)
Cobre (Cu)	15% de frecuencia con alto contenido ($> 20 \mu\text{g/ml}$)

Fuente: (Bertsch, 1995)

En estos suelos, hay una deficiencia en el nivel de bases lo que debería afectar el pH y la acidez del suelo. Por su parte, el hierro se encuentra en su mayoría en cantidades altas junto con el manganeso. No obstante, y como se ve en el cuadro 5, son muy pocos los suelos que tiene problemas con la acidez y la gran mayoría la tienen de media a media baja.

Cuadro 5. Tendencias encontradas en el análisis de la Acidez y CICE de 1295 muestras de suelo de San Carlos

Situación	Porcentaje de frecuencia con la que esta se encuentra en el suelo
Acidez del suelo	7 % de frecuencia con problemas por acidez, 19% de acidez media y 74 % acidez baja media ($\leq 0,5$ meq/100 ml)
	72 % de frecuencia presentan baja saturación de acidez ($\leq 10\%$ sat. acidez)
CICE Capacidad de intercambio de cationes efectiva	37 % de frecuencia con baja Suma Cationes (≤ 5 meq/100 ml), el resto con nivel medio
	30 % de frecuencia con bajo niveles en CICE (≤ 5 meq/100 ml)

Fuente: (Bertsch, 1987)

Estos datos sugieren que San Carlos es una región donde es necesario encalar, para precipitar el aluminio y el hierro y a la vez suplir calcio y magnesio en el caso de que se utilice cal dolomita. Además, debido al contenido pobre de bases, es importante aplicar formulas completas, que aumenten la cantidad de las mismas en el suelo (K y P). Por otra parte, debido a las perdidas por lixiviación y volatilización del Nitrógeno, es de importancia adicionar el mismo para evitar tener faltantes (UNED, 2008).

3. MARCO METODOLOGICO

3.1. MARCO ESPACIAL Y TEMPORAL

3.1.1- Espacial

La investigación se realizó en el Centro de Investigación, Transferencia Tecnológica y Educación para el Desarrollo CITTED-UNED, localizado en la comunidad de La Perla, en el distrito La Fortuna del cantón de San Carlos, Alajuela, Costa Rica (figura 4).

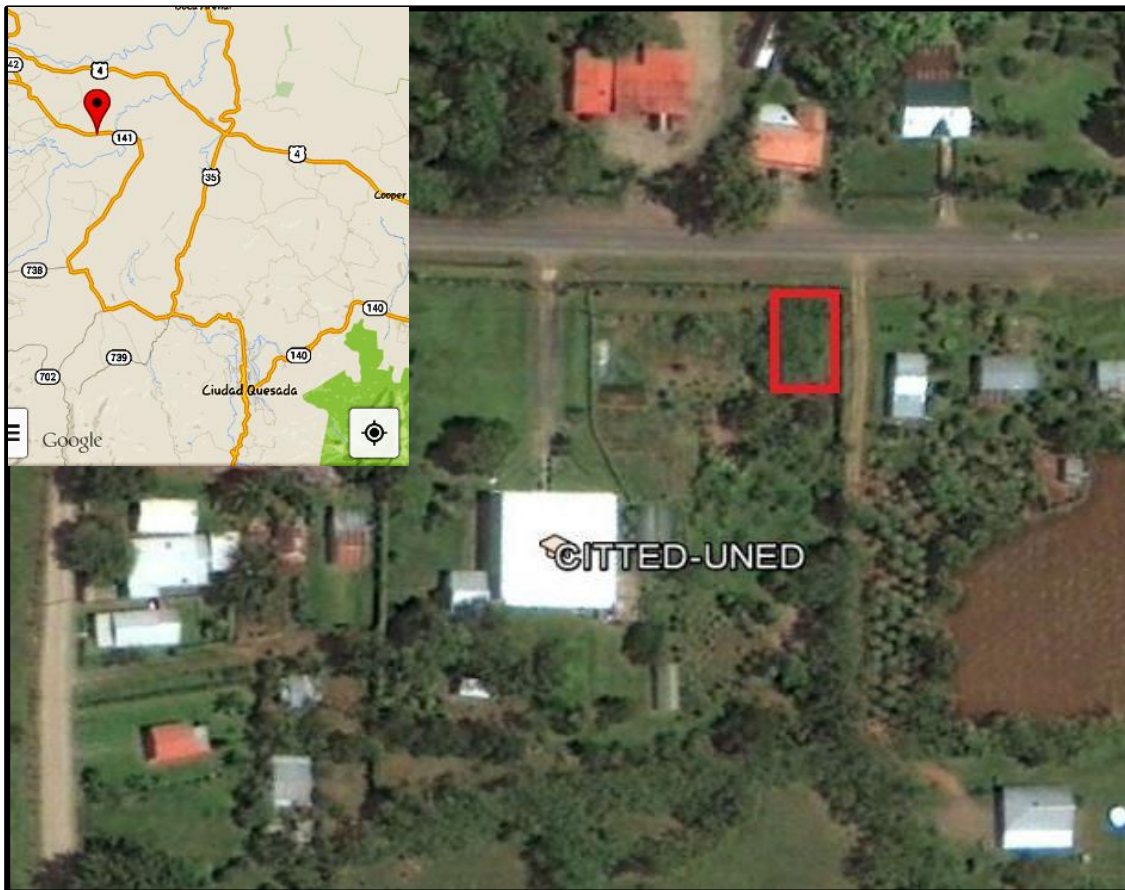


Figura 4. Ubicación de la parcela experimental en los terrenos del CITTED-UNED, La Perla, San Carlos.

Fuente: (Google Earth, 2014)

La precipitación pluvial media es de 3.500 mm anuales y una temperatura media de 26°C, con una estación lluviosa de mayo a diciembre, y una estación seca de enero a abril. Altura: 90 msnm. Coordenadas medias de 10°37'02" latitud norte y 84°30'53" longitud oeste, lo que lo ubica entre las zonas de vida: Bosque húmedo tropical (bh-T) y Bosque muy húmedo tropical (bmh-T).

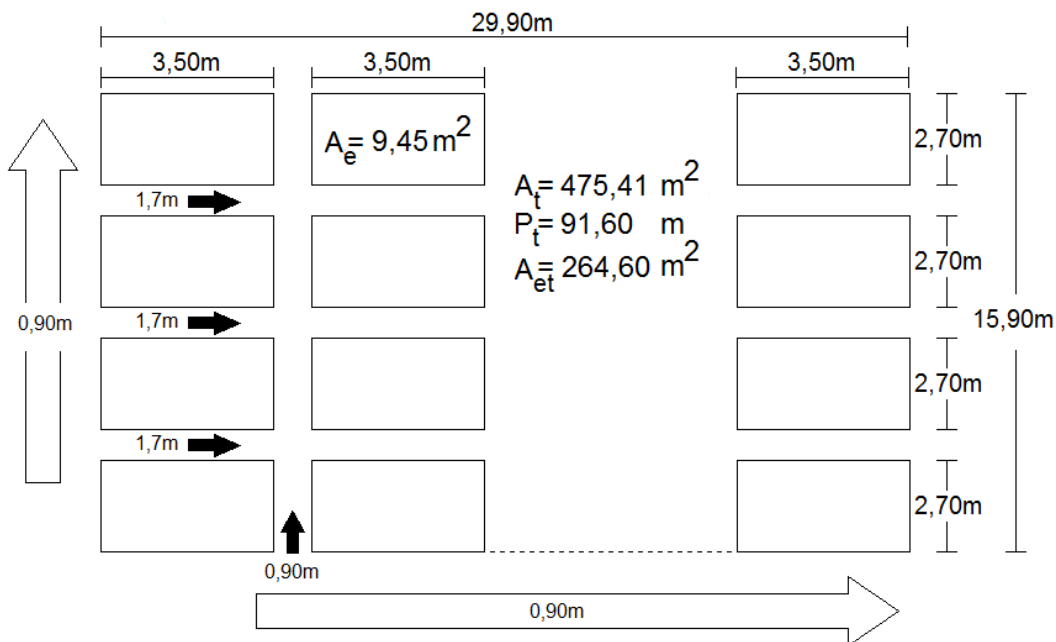
3.1.2- Temporal

El pasto Maralfalfa se sembró el día 22 de mayo del año 2013, y el muestreo se realizó el día 17 de setiembre del mismo año.

3.2. TIPO DE INVESTIGACION

La investigación se desarrolló bajo un modelo estadístico de bloques completos al azar (DBCA) de 4 bloques y 6 tratamientos más un testigo. Para las comparaciones entre medias de dosis de zeolita se empleó la prueba de Tukey al 5% de probabilidad ($\alpha = 0.05$). Cada tratamiento contó con 3 réplicas. Los datos se ingresaron en el software INFOSTAT, versión: 2011e

Se dejó una distancia de borde de 0,9 metros; una distancia de 1,7 metros entre bloques y 0,9 metros entre tratamientos. El área extensión total es de 475,41m² que corresponden a 15,90 metros de ancho por 29,90 metros de largo. El terreno se dividió en 28 micro-parcelas de 3,5 metros de largo por 2,7 metros de ancho; para un área de 9,45m² por parcela, dando una extensión de 264,6m² de área efectiva (figura 5).



A_t : área total, A_e : área efectiva, A_{et} : área efectiva total, P_t : perímetro total

Figura 5. Distribución espacial de las micro-parcelas
Fuente: autor

3.2.1- Testigo

Cultivo de Maralfalfa sembrado en suelo ultisol, sin aditamento de fertilizante. Para efecto de los análisis del ^{15}N , se toma el tratamiento 3 como testigo, pues el tratamiento control no lleva la adición de nitrógeno.

3.2.2- Tratamientos

- Cultivo de Maralfalfa sembrado en suelo ultisol, con una aplicación de zeolita al 15%.
- Cultivo de Maralfalfa sembrado en suelo ultisol, con una aplicación de urea comercial.
- Cultivo de Maralfalfa sembrado en suelo ultisol, con una aplicación de la mezcla de urea comercial y zeolita al 15%.

- Cultivo de Maralfalfa sembrado en suelo ultisol, con una aplicación de la mezcla de urea comercial y zeolita al 25%.
- Cultivo de Maralfalfa sembrado en suelo ultisol, con una aplicación de la mezcla de urea comercial y zeolita al 35%.
- Cultivo de Maralfalfa sembrado en suelo ultisol, con una aplicación de la mezcla de urea comercial y zeolita al 50%.

La urea aplicada en este proyecto de investigación (tratamientos 3-4-5-6-7), fue marcada con el isótopo ^{15}N .

3.2.3- Participantes en el proyecto de investigación

El proyecto de investigación tuvo por asesor internacional al Ingeniero Agrónomo Takashi Muraoka, del Centro de Energía Nuclear en la Agricultura CENA, de la Universidad de São Paulo USP, Brasil, campus Luiz de Queiroz.

A nivel nacional se contó con la participación de Ingeniero Agrónomo Wagner Peña Cordero, de la Cátedra Gestión Sostenible del Suelo, Universidad Estatal a Distancia, quien fungió como tutor de tesis y asesor en los criterios técnicos de la parte agronómica. Así mismo se contó con la asistencia en labores de campo, del siguiente personal del Centro de Investigación, Transferencia Tecnológica y Educación para el Desarrollo CITTED-UNED, La Perla, San Carlos:

- Aldo Chaves M.
Asistente Administrativo
- Maikol Santamaría M.
Asistente
- Juan Jiménez R.
Asistente

3.2.4- Materiales

Para determinar el efecto de la zeolita sobre la fertilidad química del suelo, la nutrición y el vigor en el cultivo, se requirieron los siguientes materiales de campo:

- Balanza de capacidad: 5000g \pm 0,01g
- Beakers de capacidad: 1000ml \pm 125ml
- Probeta de capacidad: 100ml \pm 0,5ml
- Bolsas plásticas para recolección de muestras de suelo
- Fertilizante urea (46-0-0)
- Metro para las mediciones \pm 0,5cm
- Herramientas de campo.
- Zeolitas de la especie clinoptilolita (proviene de Ecuador)
- 28 plántulas de Maralfalfa

3.2.5- Procedimiento de trabajo

El proyecto inició a finales del mes de abril del 2013, con la respectiva preparación de la parcela experimental (figura 6).

Las plántulas se sembraron la tercera semana de mayo del mismo año, a una profundidad de 3 cm tal y como lo indica la ficha técnica. Para el distanciamiento entre caña y caña se utilizó una distancia de aproximadamente 70cm puesto que al ser un ensayo para evaluar la eficiencia de la zeolita en los suelos y en la fijación del nitrógeno y no la producción masiva del cultivo, no se siguió la distancia recomendada en la ficha técnica de 50cm. La aplicación de los tratamientos se llevó a cabo la semana siguiente correspondiente a la siembra, y se realizó de forma individual planta por planta.

Después de la siembra y fertilización, en los días consecutivos hasta el día de la toma de muestra (17 setiembre, 2013) se realizaron trabajos de mantenimiento a la parcela como lo es el corte de maleza o cultivos competidores, el riego, el cual estuvo a cargo de los funcionarios del CITTED, donde se realizó por medio de mangueras los días que no hubo precipitación.



Figura 6. Parcela experimental al inicio del ensayo
Fuente: autor

3.2.5-1. Dosis

En el cuadro 6 y 7 se presentan los valores en gramos empleados de nitrógeno, ^{15}N y zeolita para el desarrollo de la investigación. Las dosis se basaron en el criterio experto del Dr. Takashi, quien asesoró las dosis empleadas en todos los proyectos participantes del ARCAL, en este caso se basó aplicando 50% de urea como recomendaciones generales del MAG para cultivos comunes. En cuanto a la aplicación de la zeolita, ésta se efectuó en la zona radicular de cada planta, cada unidad por separado, y el fertilizante se aplicó diluido en 2000 ml de agua repartida entre las 3 plantas de las parcelas de los tratamientos 3, 4, 5, 6 y 7.

Cuadro 6. Dosis total de nitrógeno aplicado

Dosis total (g)	522,39
Dosis de ¹⁵N (g)	317,23
Dosis de urea (46%) (g)	205,16

Fuente: autor

Cuadro 7. Dosis de zeolita aplicada

Tratamiento	Zeolita (%)	Zeolita (g) / planta*	Zeolita por tratamiento (g)
1	-	-	0,00
2	15	1,90	22,80
3	-	-	0,00
4	15	1,90	22,80
5	25	3,17	38,04
6	35	4,43	53,16
7	50	6,35	76,20
Total de zeolita (g)			213,00

*Cantidad de plantas: 84 unidades totales, 12 plantas por tratamiento

Fuente: autor

3.2.5-2. Muestreo del suelo

Para el muestreo del suelo, se procedió a tomar las muestras respectivas a cada micro parcela en los alrededores de la zona radicular. Esta se empacó en bolsas plásticas (figura 7) y se almacenaron en refrigeración para evitar que la actividad microbiana y la volatilización del nitrógeno afectaran en los resultados finales.



Figura 7. Almacenaje y etiquetado de las muestras del suelo

Fuente: autor

3.2.5-3. Muestreo de las plantas

Para el análisis del pasto Maralfalfa, las muestras se tomaron de las hojas. Para esto se eligieron aleatoriamente hojas representativas que fueron almacenadas en bolsas de papel. Para evitar deshidratación del material, las muestras fueron entregadas al laboratorio al día siguiente de la recolección de datos. Una vez analizado el material, los remanentes de éste (figura 8) se empacaron en pequeños sobres de papel de con un contenido de aproximadamente 5 gramos. Este nuevo material se envió a los laboratorios en Bélgica responsables del análisis del ^{15}N para su posterior análisis.



Figura 8. Muestras de Maralfalfa procesadas
Fuente: autor

3.2.5-4. Variables a valorar

Suelos:

- Propiedades químicas (macro y micronutrientes, CICE, acidez, pH, porcentaje de materia orgánica).

Pasto:

- Propiedades químicas (contenido químico del pasto, ^{15}N).

3.2.5-5. Laboratorios responsables de los análisis de las muestras

Análisis de suelos:

- Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA, Ochomogo, Cartago.
- CAFESA, Laboratorio de Suelos y Foliaves, Uruca, San José.

Análisis del pasto:

- Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA, Ochomogo, Cartago.
- ISOFYS, Isotope Bioscience Laboratory. University Gent, Bélgica.

4. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la investigación. Primero se analizaron los parámetros referentes al estudio del suelo de la parcela experimental.

4.1. SUELO PARCELA EXPERIMENTAL

La caracterización química del suelo, es utilizada como un indicador para determinar la calidad de un suelo, mide cuantitativamente la cantidad de aquellos elementos esenciales presentes. Por lo general, la fertilización de los pastos se basa en sales nitrogenadas. El fertilizante utilizado fue urea, que teóricamente aporta un 46% de nitrógeno al sistema edáfico, pero se combinó con zeolita para potenciar este aporte y determinar el efecto sobre las demás variables en el complejo de cambio del suelo (cuadro 8).

Cuadro 8. Propiedades químicas del suelo fertilizado con urea combinada con zeolita y cultivado con pasto Maralfalfa en el CITTED, San Carlos

Tratamiento del suelo	N _{total}	M.O.	pH	Acidez	Ca	Mg	K	P	Zn	Mn	Cu	Fe
	(%)			cmol ₍₊₎ /l					mg/l			
Sin fertilización	0,11	2,68	5,50	0,25	6,80	2,10	0,82	2,00	7,20	190,00	10,00	70,00
Zeolita 15%	1,02	3,01	5,50	0,25	7,10	2,80	0,87	3,00	5,30	46,00	9,00	33,00
Zeolita 25%	1,01	2,72	5,50	0,15	7,20	4,50	0,33	3,00	2,60	20,00	3,00	10,00
Zeolita 35%	1,02	3,01	5,50	0,25	7,50	3,10	0,35	4,00	3,80	145,00	7,00	23,00
Zeolita 50%	1,03	1,51	5,40	0,20	7,30	2,70	0,25	4,00	7,40	80,00	11,00	49,00
Promedio	1,02	2,56	5,48	0,21	7,28	3,28	0,45	3,50	4,78	72,75	7,50	28,75
± D.E.	0,01	0,71	0,05	0,05	0,17	0,83	0,28	0,58	2,07	54,07	3,42	16,46

Nota: M.O.= materia orgánica, Tratamientos: sin fertilización y con fertilización pero combinada con zeolita al 15, 25, 35 y 50% con respecto a la cantidad de urea. Promedio ± desviación estándar.

Fuente: autor

En el cuadro 8, se ve un incremento en los niveles de nitrógeno en todos los tratamientos respecto a las condiciones iniciales del suelo, claramente debido al aditamento de sales nitrogenadas, en este caso el fertilizante urea comercial, con un contenido de 46% de nitrógeno. A excepción del nitrógeno, calcio, magnesio y fosforo, los demás elementos no presentan una diferencia significativa entre los tratamientos y el testigo experimental.

En los análisis de fertilidad del suelo, la capacidad de intercambio catiónica CIC está asociada a la fertilidad química, pues suelos con mayor cantidad de puntos de intercambio son considerados más fértiles. Por ello mismo, es que se deben considerar las relaciones catiónicas existentes, ya que dentro de los problemas de absorción de bases, están las bajas concentraciones en la solución del suelo, también las relaciones entre cationes básicos afectan, gracias a que pueden producir problemas por antagonismo debido a desbalances. En el cuadro 9 se indican las relaciones catiónicas de los tratamientos en los que se aplicó urea combinada con distintos porcentajes de zeolita, así como también el tratamiento control, es decir, las condiciones iniciales del suelo. Para los valores de la capacidad de intercambio catiónica efectiva (CICe) y los porcentajes de saturación de bases (V) y acidez (S.A.) intercambiables, se utilizaron las siguientes formulas (Muñoz y Peña, 2012):

$$CICe = Ca + Mg + K + Al \quad \text{Ecuación (6)}$$

$$S.A. = \left(\frac{Ca+Mg+K}{CICe} \right) \times 100 \quad \text{Ecuación (7)}$$

$$V = \left(\frac{Al}{CICe} \right) \times 100 \quad \text{Ecuación (8)}$$

Cuadro 9. Relaciones catiónicas del complejo del suelo fertilizado con urea combinada con zeolita y cultivado con pasto Maralfalfa en el CITTED, San Carlos

Tratamiento del suelo	Ca+Mg+K	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	(Ca+Mg)/K	CICe	S.A.	V
	cmol ₍₊₎ /l						%	
Sin fertilización	9,72	3,24	8,29	2,56	10,85	9,97	2,51	97,49
Zeolita 15%	10,77	2,54	8,16	3,22	11,38	11,02	2,27	97,73
Zeolita 25%	12,03	1,60	21,82	13,64	35,45	12,18	1,23	98,77
Zeolita 35%	10,95	2,42	21,43	8,86	30,29	11,20	2,23	97,77
Zeolita 50%	10,25	2,70	29,20	10,80	40,00	10,45	1,91	98,09
Promedio	11,00	2,31	20,15	9,13	29,28	11,21	1,91	98,09
± D.E.	0,75	0,49	8,76	4,40	12,58	0,72	0,48	0,48

CICe; capacidad de intercambio catiónico efectivo. S.A.: Saturación de acidez. V: Saturación de bases. Tratamientos: sin fertilización y con fertilización pero combinada con zeolita al 15, 25, 35 y 50% con respecto a la cantidad de urea. Promedio ± desviación estándar.

Fuente: autor

A pesar de que los suelos de la parcela experimental presentan una tendencia a la acidez tal como se ve en el cuadro 8, con pH alrededor de los 5,50, tanto en las condiciones iniciales como en las condiciones donde se aplicaron los tratamientos, queda en claro que los suelos estudiados no presentan problemas de acidez, pues la saturación de acidez (cuadro 9) se mantiene en los niveles por debajo del nivel medio tanto en las referencias de Bertsch, (1987) y Muñoz y Peña, (2012), en los anexos VI y VII. Lo que denota una mayor interacción bases, que puede apreciarse en el cuadro anterior, ya que las relaciones entre Ca/K, Mg/k y (Ca+Mg)/K, son las que presentaron un incremento significativo respecto al tratamiento testigo, confirmando la ausencia de toxicidad por acidez.

4.2. PASTO MARALFALFA

En cuanto al efecto de la zeolita sobre las plantas, se espera observar una respuesta fisiológica, en especial en el crecimiento orthotrópico en los pastos, dado que el consumo de fertilizantes nitrogenados y la disposición de otros

elementos esenciales provocan dicho crecimiento en el pasto, por lo que se valoró la altura (en metros) final obtenida en las muestras. Se logra notar que el crecimiento es constante en todos los tratamientos, existe una altura similar tanto al inicio como al finalizar el ensayo experimental (figura 9).

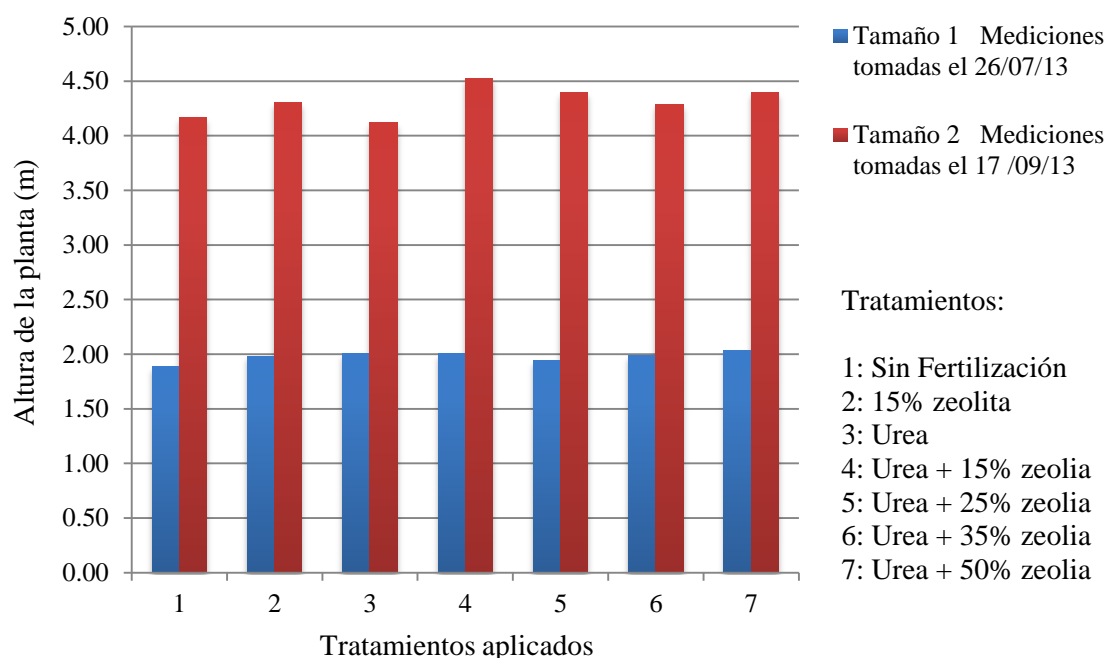


Figura 9. Altura de las plantas de Maralfalfa por tratamiento, fertilizadas con urea combinada con zeolita durante tres meses de crecimiento en el CITTED, San Carlos
Fuente: autor

Este pasto forrajero, según se indica en su ficha técnica, puede llegar superar los 4 metros de altura. Se aprecia en la figura anterior que en todos los tratamientos, incluido el testigo, se superó los 4 metros de crecimiento orthotrópico. Al mes y medio de iniciado el ensayo, las plantas promediaron una altura de 2 metros, pero al cabo de los tres meses la altura máxima fue de 4,5 metros, correspondiente al tratamiento del suelo fertilizado con urea combinada con zeolita al 15%. Se observa también el comportamiento del tratamiento

zeolita como un conjunto contra los tratamientos 1, 2 y 3 en las 2 fechas de medición realizadas (cuadro 10).

Cuadro 10. Altura de las plantas de maralfalfa (promedio por lote) fertilizadas con urea y zeolita a los dos y tres meses de crecimiento

Tratamiento	Altura promedio hasta el periodo de corta del pasto (m)	
	2° mes	3 ^{er} mes
Sin urea ni zeolita	1,89	4,16
Solo con 15% zeolita	1,98	4,30
Solo con urea	2,01	4,12
Grupo 4, 5, 6 y 7 Fertilización con urea y zeolita	2,01	4,52
	1,94	4,40
	1,99	4,29
	2,03	4,39
Media ± D.E.	1,99 0,04	4,40 0,09

Otra respuesta a la fertilización relacionada al crecimiento vegetativo es su efecto sobre la nutrición (cuadro 11).

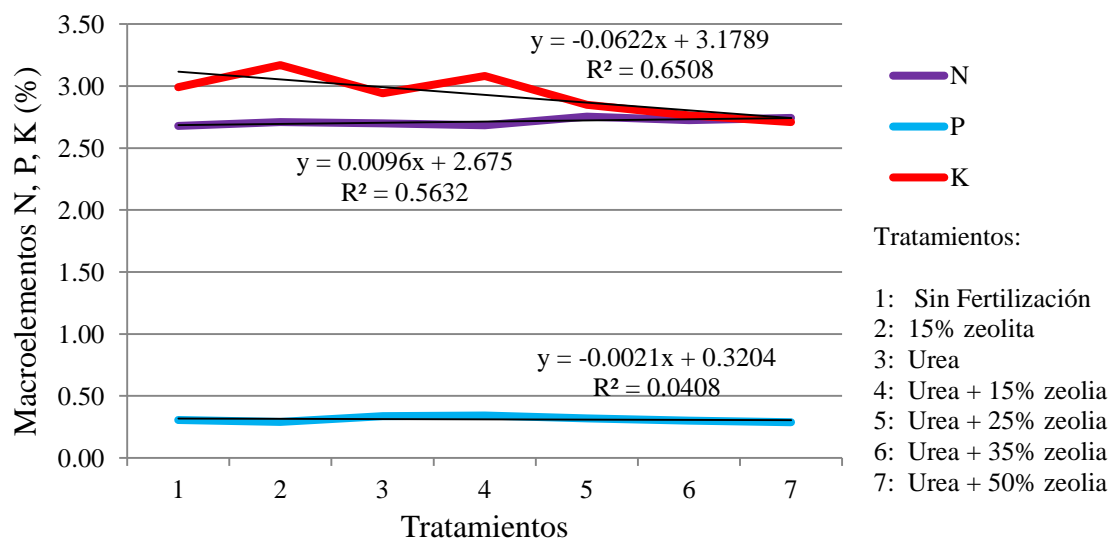


Figura 10. Nutrición N-P-K (en mg/l) del pasto Maralfalfa durante 3 meses, en CITTED San Carlos

Fuente: autor

Se logra observar que en los tres macro-elementos primarios, N-P-K, no hubo diferencias significativas (figura 10). No obstante, a pesar que el nitrógeno y el fósforo fue aprovechado de una forma similar en todos los tratamientos, fue el calcio el que ha marcado ligeramente la diferencia, especialmente en el grupo de plantas donde se aplicó zeolita (cuadro 11)

Cuadro 11. Nutrición del pasto Maralfalfa a los tres meses de crecimiento y fertilizado con urea combinada con zeolita en el CITTED, San Carlos

Tratamiento	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Zn	Mn	Fe
	%					mg/l			
1	2,66	0,29	3,05	0,48	0,22	11,00	73,00	87,00	501,00
	2,63	0,29	3,08	0,42	0,17	9,00	38,00	97,00	212,00
	2,69	0,28	2,79	0,39	0,22	9,00	36,00	106,00	399,00
	2,74	0,37	3,04	0,57	0,27	9,00	39,00	93,00	296,00
Media	2,68	0,31	2,99	0,47	0,22	9,50	46,50	95,75	352,00
± D.E.	0,05	0,04	0,13	0,08	0,04	1,00	17,71	7,97	125,36
2	2,72	0,31	3,31	0,45	0,15	11,00	42,00	81,00	419,00
	2,72	0,24	3,95	0,51	0,21	8,00	37,00	87,00	234,00
	2,74	0,25	2,32	0,72	0,27	9,00	48,00	106,00	414,00
	2,66	0,36	3,10	0,65	0,26	9,00	30,00	103,00	503,00
Media	2,71	0,29	3,17	0,58	0,22	9,25	39,25	94,25	392,50
± D.E.	0,03	0,06	0,67	0,12	0,06	1,26	7,63	12,15	113,28
3	2,60	0,29	3,07	0,59	0,22	11,00	43,00	114,00	607,00
	2,71	0,27	3,04	0,37	0,17	9,00	39,00	83,00	709,00
	2,69	0,37	2,81	0,56	0,23	10,00	39,00	97,00	602,00
	2,80	0,42	2,85	0,68	0,33	8,00	34,00	98,00	511,00
Media	2,70	0,34	2,94	0,55	0,24	9,50	38,75	98,00	607,25
± D.E.	0,08	0,07	0,13	0,13	0,07	1,29	3,69	12,68	80,92
4	2,81	0,31	3,23	0,47	0,18	10,00	36,00	93,00	459,00
	2,53	0,28	2,82	0,60	0,21	9,00	34,00	74,00	536,00
	2,63	0,39	3,01	0,57	0,03	12,00	39,00	75,00	532,00
	2,77	0,39	3,27	1,07	0,28	8,00	35,00	67,00	283,00
Media	2,69	0,34	3,08	0,68	0,17	9,75	36,00	77,25	452,50
± D.E.	0,13	0,06	0,21	0,27	0,11	1,71	2,16	11,09	118,41

Media ± desviación estándar, Tratamientos: 1) Control: pasto sin fertilización, 2) con zeolita al 15%, 3) con fertilización urea, 4) con urea + zeolita al 15%, 5) con urea + zeolita al 25%, 6) con urea + 35%, 7) con urea + zeolita al 50%, Zeolita: % con respecto a la fertilización,

Fuente: autor

Cuadro 11 (continuación). Nutrición del pasto Maralfalfa a los tres meses de crecimiento y fertilizado con urea combinada con zeolita en el CITED, San Carlos

Tratamiento	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Zn	Mn	Fe
	%					mg/l			
5	2,83	0,34	3,42	0,55	0,24	11,00	39,00	96,00	686,00
	2,58	0,36	2,55	0,39	0,22	10,00	38,00	93,00	510,00
	2,74	0,32	2,57	0,33	0,17	10,00	33,00	84,00	324,00
	2,86	0,26	2,86	1,52	0,36	7,00	32,00	108,00	453,00
Media	2,75	0,32	2,85	0,70	0,25	9,50	35,50	95,25	493,25
± D.E.	0,13	0,04	0,41	0,56	0,08	1,73	3,51	9,91	150,22
6	2,86	0,36	3,06	0,44	0,19	12,00	41,00	93,00	585,00
	2,74	0,26	2,62	0,64	0,23	8,00	32,00	79,00	610,00
	2,58	0,32	2,67	0,54	0,22	8,00	30,00	71,00	298,00
	2,72	0,26	2,71	0,86	0,23	6,00	32,00	80,00	428,00
Media	2,73	0,30	2,77	0,62	0,22	8,50	33,75	80,75	480,25
± D.E.	0,11	0,05	0,20	0,18	0,02	2,52	4,92	9,11	145,78
7	2,74	0,31	3,21	0,44	0,16	10,00	40,00	102,00	365,00
	2,83	0,25	2,55	0,43	0,22	9,00	33,00	67,00	477,00
	2,66	0,30	2,54	1,62	0,19	7,00	29,00	88,00	449,00
	2,74	0,29	2,54	0,53	0,19	8,00	25,00	69,00	516,00
Media	2,74	0,29	2,71	0,76	0,19	8,50	31,75	81,50	451,75
± D.E.	0,07	0,03	0,33	0,58	0,02	1,29	6,40	16,62	64,03

Media ± desviación estándar, Tratamientos: 1) Control: pasto sin fertilización, 2) con zeolita al 15%, 3) con fertilización urea, 4) con urea + zeolita al 15%, 5) con urea + zeolita al 25%, 6) con urea + 35%, 7) con urea + zeolita al 50%, Zeolita: % con respecto a la fertilización,

Fuente: autor

De la misma forma sucedió con los micronutrientes, pues se mantuvo en un rango similar en todos los tratamientos, aunque se nota que el Zn y Mn fue menor cuando se ha aplicado zeolita al 35 y 50% con respecto a la fertilización nitrogenada, así como también se aprecia un incremento del contenido de Fe en las plantas en los tratamientos con zeolita, en el tratamiento 3 en el cual sólo se aplicó urea, se nota un incremento de este elemento respecto a las demás micro parcelas (cuadro 11).

Además de lo anterior, fue necesario determinar dicho efecto sobre el aprovechamiento del nitrógeno para las plantas. Por lo cual, la urea empleada en los tratamientos se marcó con el isótopo ^{15}N , cuya abundancia de átomos fue de 5,16%, se realizó una dilución al 3,5% y se aplicó en líquido al suelo en la zona rizosférica según la cantidad establecida para el ensayo, De las muestras foliares del pasto, se determinó %N atm y % N total foliar, con los cuales se calculó la cantidad de nitrógeno derivado del fertilizante y del suelo, Los resultados se presentan con un control que es el tratamiento 3, donde solo se aplicó urea marcada, y el grupo de tratamientos con zeolita, cada uno con cuatro réplicas, la media de valores y su desviación estándar (cuadro 12).

Cuadro 12. Contenido de N (%) en pasto Maralfalfa derivado de la fertilización mezclada con zeolita (Nddf) y derivado del suelo (Ndds) durante 3 meses de crecimiento sobre un ultisol en el CITTED, San Carlos

Tratamiento	N	^{15}N ‰ versus Air	^{15}N in at	Exceso de ^{15}N en la planta	Exceso de ^{15}N en el fertilizante	Nddf (%)	Ndds (%)
3	1,65	346,03	0,49	0,13	3,134	4,034	95,966
	1,70	531,83	0,56	0,19	3,134	6,191	93,809
	1,98	575,77	0,58	0,21	3,134	6,701	93,299
	1,91	555,49	0,57	0,20	3,134	6,465	93,535
Media:	1,81	502,28	0,55	0,18	3,13	5,85	94,15
±D.E.	0,16	105,71	0,04	0,04	0,00	1,23	1,23
Varianza %:	0,02	11173,81	0,00	0,00	0,00	1,51	1,51
4	1,74	132,36	0,41	0,05	3,134	1,550	98,450
	1,66	514,82	0,55	0,19	3,134	5,994	94,006
	1,89	391,22	0,51	0,14	3,134	4,559	95,441
	2,15	358,81	0,50	0,13	3,134	4,183	95,817
Media:	1,86	349,30	0,49	0,13	3,13	4,07	95,93
±D.E.	0,21	159,48	0,06	0,06	0,00	1,85	1,85
Varianza %:	0,05	25435,28	0,00	0,00	0,00	3,43	3,43

Tratamientos: 3: urea. 4: urea + zeolita 15%. 5: urea + zeolita 25%. 6: urea + zeolita 35%. 7: urea + zeolita 50%. Media ± desviación estándar, %Var: varianza. R2: 0,015 de %N-15N. Valor medio en aire es de 0,3366% ^{15}N . Materia seca = 18,07%. Tratamientos 3, 4, 5, 6 y 7 marcados con ^{15}N .

Fuente: autor

Cuadro 12 (continuación). Contenido de N (%) en pasto Maralfalfa derivado de la fertilización mezclada con zeolita (Nddf) y derivado del suelo (Ndds) durante 3 meses de crecimiento sobre un ultisol en el CITTED, San Carlos

Tratamiento	N	¹⁵ N ‰ versus Air	¹⁵ N in at	Exceso de ¹⁵ N en la planta	Exceso de ¹⁵ N en el fertilizante	Nddf (%)	Ndds (%)
5	1,77	440,07	0,53	0,16	3,134	5,126	94,874
	2,04	314,09	0,48	0,11	3,134	3,663	96,337
	2,10	606,53	0,59	0,22	3,134	7,057	92,943
	2,11	673,73	0,61	0,25	3,134	7,836	92,164
Media:	2,00	508,60	0,55	0,19	3,13	5,92	94,08
±D.E.	0,16	162,68	0,06	0,06	0,00	1,89	1,89
Varianza %:	0,02	26463,17	0,00	0,00	0,00	3,56	3,56
6	1,86	386,89	0,51	0,14	3,134	4,509	95,49
	1,78	290,84	0,47	0,11	3,134	3,393	96,61
	2,00	646,53	0,60	0,24	3,134	7,521	92,48
	1,68	502,12	0,55	0,18	3,134	5,846	94,15
Media:	1,83	456,59	0,53	0,17	3,13	5,32	94,68
±D.E.	0,13	153,28	0,06	0,06	0,00	1,78	1,78
Varianza %:	0,02	23493,69	0,00	0,00	0,00	3,16	3,16
7	1,94	818,84	0,66	0,30	3,134	9,517	90,48
	2,22	469,95	0,54	0,17	3,134	5,473	94,53
	1,74	775,56	0,65	0,28	3,134	9,016	90,98
	2,17	397,45	0,51	0,15	3,134	4,631	95,37
Media:	2,02	615,45	0,59	0,23	3,13	7,16	92,84
±D.E.	0,22	212,68	0,08	0,08	0,00	2,47	2,47
Varianza %:	0,05	45231,94	0,01	0,01	0,00	6,08	6,08

Tratamientos: 3: urea. 4: urea + zeolita 15%. 5: urea + zeolita 25%. 6: urea + zeolita 35%. 7: urea + zeolita 50%. Media ± desviación estándar, %Var: varianza. R²: 0,015 de %N-15N. Valor medio en aire es de 0,3366% 15N. Materia seca = 18,07%. Tratamientos 3, 4, 5, 6 y 7 marcados con 15N.

Fuente: autor

En cuanto al consumo del fertilizante, más específicamente, al consumo del nitrógeno realizado por las plantas, se aprecia en el cuadro anterior, que no hubo diferencias significativas en los tratamientos. Sin embargo, se nota un mayor consumo en los tratamientos donde se adicionó más zeolita, es decir, los tratamientos 6 y 7 con porcentaje de zeolita de 35 y 50% respectivamente, sin restar importancia al tratamiento con 25% de zeolitas.

5. DISCUSIÓN

5.1. ANÁLISIS DE SUELOS DE LA PARCELA EXPERIMENTAL

5.1.1- Propiedades químicas del suelo

El suelo utilizado en el proyecto de investigación se clasifica en el orden de los Ultisoles. Son suelos fuertemente meteorizados, viejos, de color rojo, de baja fertilidad, típicos del trópico como Costa Rica (Arias, 1998). En realidad, dada la caracterización física y química, son ultisoles con características ándicas, pero para solventar la acidez algunos agricultores aplican cal y en algunas ocasiones abonos orgánicos, lo cual es característico de la zona de San Carlos.

De forma general se puede indicar que el suelo estudiado en sus condiciones iniciales, presenta contenidos de material orgánico bajo, lo cual es característico del orden de suelos en la región. Por lo cual se esperaría bajo estas circunstancias valores menores en macro-nutrientes esenciales, debidos a la acidez. El análisis de suelo muestra un pH medio de 5,50 (cuadro 8) indicando ser moderadamente ácido, característico del orden ultisol.

Aunque cabe aclarar que no hay toxicidad por aluminio o por otros agentes relacionados con los iones hidronio (H_3O_+), que son promotores de la acidez y de múltiples afecciones en la rizosfera, esto se puede corroborar en el mismo cuadro, donde los valores para la acidez se encuentran en el rango de menor acidez tanto en las referencias de Muñoz y Peña, 2012 como en la de Bertsch, 1987. En tal caso, los elementos esenciales como potasio, calcio y magnesio, están en niveles óptimos, no así el contenido en nitrógeno, ya que éste último es un elemento muy móvil y según las características físicas del suelo, el elemento N puede perderse por lixiviación, por volatilización o arrastre (escorrentía), lo que indica que es necesario incorporar materiales altos en este

macro-nutrimiento o acondicionar el medio que favorezca la retención o fijación, como es el uso de la zeolita o su combinación con abonos orgánicos.

Para comparar los suelos donde se aplicó zeolita y aquel donde no se aplicó algún insumo al suelo, se realizaron los análisis correspondientes a la fertilidad química del suelo (químico completo) mostrados en el cuadro 8, y para su interpretación se toma como punto de comparación los datos óptimos de las referencias bibliográficas citados por Muñoz y Peña (2012) y Bertsch (1987). Las muestras se tomaron como una muestra conjunta para evaluar si la adición de zeolita tiene algún efecto sobre las propiedades del suelo de la parcela experimental.

Según los análisis estadísticos realizados (anexo XII), se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en 4 de los elementos analizados, a saber: nitrógeno, calcio, magnesio y fósforo. En cuanto al nitrógeno del suelo, es de esperar un notorio aumento de este elemento, ya se debe a la adición del fertilizante, urea comercial, el cual posee un 46% de nitrógeno, sin dejar de lado que el uso de los minerales silicatados (zeolitas) hayan optimizado la presencia del nitrógeno natural del suelo, y hecho que este elemento este biodisponible para el cultivo. Sin embargo a pesar del incremento respecto al testigo, no se nota diferencia ($p \geq 0,05$) entre los tratamientos en los cuales se incorporó la zeolita, de lo cual se infiere que, en nitrógeno, la presencia de zeolita va a biodisponer este elemento de forma regulada en la estructura del suelo sin importar las dosis empleadas en esta investigación (15, 25, 35 y 50% de zeolita); aspecto que es similar con los fosfatos disponibles para la nutrición vegetal.

A pesar de que el fósforo soluble aumento sus niveles en los tratamientos con zeolita respecto al testigo, aún hay deficiencia de este elemento según Muñoz y Peña (2012) y Bertsch (1987), motivo que puede generar estrés en los cultivos.

Los tratamientos con mayores dosis de zeolita (35 y 50%) presentaron los mejores incrementos de fósforo, por lo cual, el uso de las zeolitas optimizó la movilidad de este elemento en los suelos, pues al no haberse realizado aplicaciones de esta enmienda, era de esperar que los niveles de este macroelemento se mantuvieran igual que en el tratamiento testigo.

Respecto a los demás cationes del complejo de cambio (Mg y Ca), cabe mencionar que al no haber alteración del medio por acidez, los niveles de estos dos elementos están en equilibrio en condiciones iniciales, lo cual se puede ver en el cuadro 8. Ambos nutrientes secundarios presentan diferencias ($p \leq 0,05$) entre los tratamientos con zeolita respecto al tratamiento testigo. En ambos, se da un incremento, lo cual probablemente se deba a la serie de puntos de intercambio iónicos que poseen las zeolitas, que interactúan de manera activa con los iones de carga positiva y negativa (aniones y cationes), lo que permite el comportamiento descrito de estos elementos: incrementar su concentración manteniéndose en niveles óptimos. En el caso del calcio no hay mayor variación entre los tratamientos, no así con el magnesio, el cual tiene mejor presencia en los tratamientos 5 y 6 (25 y 35% de zeolita).

La materia orgánica presente en los suelos no presentó diferencias significativas ($p \geq 0,05$) entre el tratamiento testigo y los tratamientos con zeolita, lo cual cabría esperar, las zeolitas son acondicionadores de la fertilidad química de los suelos, no así de la fertilidad biológica, sin embargo se debe tener presente si las zeolitas tienen algún efecto en la fertilidad física del suelo, ya que según Montalvo *et al* (1991), el uso de este material mejora la fluidez del agua por la reducción de la densidad aparente.

Como se evidencia en el cuadro 8, el suelo de la parcela experimental no presenta contaminación por acidez. Los resultados del pH y de la acidez según el mismo cuadro, no se presentan diferencias ($p \geq 0,05$) entre testigo y

tratamientos. En ambos casos, sus valores se encuentran en los niveles medios según Muñoz y Peña (2012), y para las referencias de Bertsch (1987), la acidez está por debajo de los niveles medios.

A pesar de que el elemento primario potasio no presenta diferencias ($p \geq 0,05$), solo la concentración inicial y la del tratamiento 4 (15% zeolita), exponen valores superiores al rango deseable según los anexos VI y VII. Los demás tratamientos 5, 6 y 7 (25, 35 y 50% zeolita respectivamente) presentan una reducción considerable del elemento, ubicándose en rangos óptimos. Según Kass (1996), el potasio puede estar más disponible en suelos ácidos debido a que la presencia de iones aluminio y sus formas hidratadas se fijan en los sitios de intercambio de las arcillas permitiendo así la disponibilidad del K. Por lo cual, los tratamientos que presentaron la reducción de K concuerdan con lo descrito por Kass (1996).

En cuanto al análisis de los micro nutrientes Zn, Mn, Cu y Fe, los niveles extraíbles que aparecen en el reporte (cuadro 8) tienden a sobrepasar en algunos tratamientos, los rangos reportados en los anexos VI y VII. Sin embargo, con la excepción del zinc, los niveles de estos no afectan las recomendaciones de fertilización. Los análisis de suelos con niveles de zinc por debajo de 4 mg/l y con pH arriba de 6.0 generaran una recomendación para la aplicación de zinc (Espinoza *et al*, 2012), pero según el análisis del suelo, los valores de Zn encontrados tanto en el tratamiento testigo como en los demás tratamientos con zeolita, superan esta deficiencia, pero no a tal punto de volver tóxicas las condiciones del suelo.

Niveles muy altos de micronutrientes no indican necesariamente que una planta será afectada por toxicidad del micronutriente específico. Por ejemplo, análisis de suelos con niveles de hierro arriba de 200 mg/l y niveles de zinc arriba de 40 mg/l son algunas veces observados, pero dichos niveles no son tóxicos para

una planta en la mayoría de los casos (Espinoza *et al*, 2012). Sin embargo cabe resaltar que las concentraciones de Fe en el suelo no sobrepasan los 50 mg/l en los tratamientos con zeolita, no así para la concentración en el tratamiento testigo que alcanza los 70 mg/l, lo cual, sigue sin presentar niveles de toxicidad. Según los mismos autores, en contraste, niveles de manganeso que excedan 200 mg/l, acompañado con pH de suelos de 5.2, podrían resultar en toxicidad de manganeso. En el cuadro 8, se observa que en condiciones iniciales hay una presencia elevada de Mn (190 mg/l), pero al adicionar la zeolita, este valor desciende a niveles óptimos según Bertsch (1987). De los resultados se infiere que el uso de este mineral acondiciona las propiedades del suelo incrementando su fertilidad química, permitiendo al cultivo una biodisponibilidad de elementos en concentraciones no tóxicas.

5.1.2- Relaciones catiónicas del suelo

Como se ha mencionado en puntos anteriores, las zeolitas, al poseer una superficie específica que permite una movilidad iónica por medio de los procesos de sorción, mejoran las condiciones químicas de los suelos, lo cual está asociado a la fertilidad de los mismos. Para determinar este efecto, se realizó el análisis de las relaciones catiónicas que se dan en el suelo, los análisis estadísticos se presentan en el anexo XIII.

Se encontraron diferencias ($p \leq 0,05$) entre el testigo y los tratamientos en todas las relaciones catiónicas del cuadro 9, excepto en la relación Ca/Mg y en la saturación de acidez. La sumatoria de bases (Ca+Mg+K) se utiliza para definir el grado de fertilidad que posee el suelo. Altas concentraciones de estos elementos, especialmente Ca y Mg, se traducen en una mejor fertilidad. Como se mencionó anteriormente, estos dos elementos presentaron aumentos en las concentraciones en los tratamientos con zeolita, y el K se equilibró en niveles deseados, por lo que es de esperar que la suma de estas bases también

presente un incremento respecto al testigo tal y como se ve en el cuadro 9. Según lo anterior se logra interpretar que la sumatoria de las bases en todos los tratamientos sobrepasa al testigo con valores medios, ya que según Muñoz y Peña (2012) y Bertsch (1987), si el suelo presenta una suma de bases inferior a $5 \text{ cmol}_{(+)}/\text{l}$ se considera que es de baja fertilidad, de $5-12 \text{ cmol}_{(+)}/\text{l}$ es de fertilidad media y más de $12 \text{ cmol}_{(+)}/\text{l}$ quiere decir que el suelo posee una fertilidad alta. De lo cual se infiere que el suelo posee un nivel medio de fertilidad; esto a pesar que Bertsch (1996), indica que los suelos del orden ultisol presentan lixiviación de bases (Ca, Mg, y K) y una baja CICe. Se demuestra que el suelo tiene una buena capacidad de intercambio catiónico.

Según Méndez y Bertsch (2012), en Costa Rica el desbalance más frecuente es entre Ca/K y (Ca+Mg)/K seguido del Mg/K. Para el análisis realizado se aprecia que para las relaciones catiónicas todos los tratamientos donde se aplicó zeolita presentan valores con niveles óptimos como lo establece Méndez y Bertsch (2012), es decir el contenido de bases es balanceado por lo que se da una absorción adecuada de cada catión Ca, Mg y K por parte de la raíz del cultivo. Lo mismo ocurre con la relación Ca/Mg, con la diferencia que esta relación no presentó diferencias respecto a las condiciones iniciales.

Respecto a los resultados de saturación de acidez, no hubo diferencias ($p \geq .05$) entre tratamientos y las condiciones iniciales. Por las interacciones catiónicas presentes en el suelo, se presentan porcentajes de acidez del orden de 2-3%, lo cual coloca el suelo en un rango de saturación de acidez bajo (cuadro 9), indicando que los espacios ocupados por H_+ y Al_{3+} son menores en comparación con los cationes básicos.

Si bien es cierto, en las condiciones iniciales del suelo, éste ya podría considerarse como un suelo de fertilidad media, no puede dejarse de lado el efecto activo y aditivo de las zeolitas, pues en las relaciones catiónicas se

mejoró significativamente el balance, mejorando a su vez las propiedades del mismo (fertilidad química).

5.2. ANÁLISIS DEL PASTO MARALFALFA

5.2.1- Crecimiento orthotrópico

El ensayo inicia con plántulas del pasto Maralfalfa (*Pennisetum* sp), fertilizadas con urea (46% de nitrógeno) combinada con distintas dosis de zeolita para ver el efecto que tiene este material en el aprovechamiento del fertilizante por parte de las plantas. Es de esperar que, si al suelo se le incorpora un material que optimice su fertilidad natural, esto se vea reflejado en el crecimiento de la planta, mostrando un cultivo con más vigor, más producción respecto al mismo cultivo sembrado en un suelo al que no se le haya adicionado un material potenciador. Sin embargo, el resultado no es el esperado, pues según la figura 9, se aprecia que el crecimiento de las plantas fue similar en todos los tratamientos incluyendo el testigo, tanto en la primera medición como en la medición final. En todas las parcelas el crecimiento superó los cuatro metros de elevación, de nivel de suelo al ápice de las hojas. El tratamiento 4 (15% de zeolita) presentó el mayor crecimiento llegando a los 4,52 metros, sin embargo, no se da una diferencia significativa respecto a los demás tratamientos. Tal comportamiento es probable que se deba a las condiciones naturales del suelo, ya que como se mencionó en el análisis del suelo de la parcela experimental, éste en condiciones iniciales presenta una capacidad de intercambio catiónica buena, así como las relaciones catiónicas, otorgándole una fertilidad media. La incorporación de los tratamientos de zeolita al suelo balanceó la fertilidad química, sin embargo no fue notoria esta respuesta en el crecimiento de la planta, dado que ésta al ser una plántula en un estado fenológico de mucha demanda nutricional al inicio del proyecto, y durante este crecimiento vegetativo requerirá la mayor cantidad de elementos esenciales, por lo cual si no los

obtiene del insumo o fertilizante que le es proporcionado, la planta entonces lo tomará del sistema edáfico, es decir de la fertilidad natural del propio suelo.

No obstante al hacer el análisis estadístico (anexo XIV) del conjunto zeolita versus los tratamientos 1, 2 y 3 (suelo/planta, suelo/zeolita y suelo/urea, respectivamente) si se presentan diferencias significativas en los resultados. Los valores tabulados en el cuadro 10, se sometieron a un análisis de comparación de medias por la prueba *T Student* con un nivel de significancia del $\alpha=0,05$. De este análisis se infiere que el conjunto zeolita marca diferencias significativas ($p \leq 0,05$) respecto a los tratamientos donde no se aplicó este material.

5.2.1-1. Tamaño 1 (Mediciones correspondientes al 26 julio, 2013)

Referente a las mediciones realizadas en la mitad del periodo de desarrollo del pasto, se marca una diferencia entre el conjunto zeolita y el tratamiento testigo (suelo/planta) (anexo XIV), presentándose un mayor crecimiento orthotrópico en las plantas fertilizadas con urea combinada con zeolita. No ocurre lo mismo con los tratamientos 2 y 3 (planta/zeolita y planta/urea), no se hallan diferencias significativas ($p \geq 0,05$), lo cual es un comportamiento esperado, pues a diferencia del tratamiento testigo, los demás tratamientos fueron fertilizados con urea combinada zeolita, a excepción del tratamiento 2 que solo se adicionó zeolita, lo cual corrobora que este material potenciador acondiciona la zona edáfica haciendo que los elementos estén de forma biodisponible para el cultivo.

5.2.1-2. Tamaño 2 (Mediciones correspondientes al 17 setiembre, 2013)

Los resultados finales del crecimiento vuelven a marcar diferencias ($p \leq 0,05$), esta vez entre el conjunto zeolita y los tratamientos 1 y 3 (suelo/planta y

suelo/urea), no así con el tratamiento 2 (suelo/zeolita). La diferencia la presenta el tratamiento 3, el cual en las primeras mediciones no se diferenció respecto al conjunto zeolita, probablemente porque este tratamiento no fue combinado con un potenciador, dando a lugar a que el nitrógeno se perdiera por lixiviación, arrastre o vaporización.

5.2.2- Análisis foliar

El análisis de tejido vegetal, generalmente conocido como análisis foliar, determina el contenido elemental de nutrientes de una parte de la planta en particular, que comúnmente es la hoja, debido a que la demás partes de la planta es más fibrosa, que es donde no se deposita en altas cantidades los elementos esenciales, exceptuando el fruto. Los resultados de los análisis foliares pueden utilizarse para cumplir varios objetivos. El más frecuente de estos objetivos es la verificación de los síntomas de deficiencia. Sin embargo, el uso más importante de los resultados del análisis foliar es el de determinar si el nivel de fertilidad del suelo y las dosis de los fertilizantes aplicados son suficientes para cubrir las necesidades del cultivo, esto se comprueba con las respuestas observables de la fisiología de la planta. Tal como era de esperar según el análisis del crecimiento orthotrópico y el análisis de los suelos, el sistema edáfico posee la capacidad nutricional suficiente para el desarrollo del pasto.

El contenido inicial del nitrógeno en suelo es bajo, pero no lo suficientemente bajo para que la Maralfalfa presentara síntomas de estrés de este elemento, aunado a la buena disposición de los otros micronutrientes (cuadro 11), permitió el desarrollo normal del cultivo, esto queda demostrado con el análisis de varianza ANDEVA mostrado en el anexo XV, donde no se presentan diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en todos los tratamientos, tanto en los elementos primarios, los secundarios y los elementos menores. Los 6 tratamientos y el

testigo presentan un cuadro nutricional constante. Así mismo, la planta tiene una capacidad de absorción de elementos esenciales, principalmente N, P y K, proveniente de la fertilidad natural del suelo y proveniente de la fertilización, por lo que cuando no hay aporte suficiente por el fertilizante, la planta absorberá lo que hay en el medio circundante a nivel rizosférico, aunado a la potenciación del mineral silicatado o zeolita en adsorber diferentes cationes esenciales y proveerlo a las plantas.

Sin embargo en el anexo XVI se muestra el análisis entre el conjunto zeolita con los tratamientos 1, 2 y 3, requisito solicitado por los entes del ARCAL, para ver el efecto macro que se da entre tratamientos testigos (suelo/planta, suelo/zeolita y suelo/urea) vs el conjunto zeolita de los tratamientos 4, 5, 6 y 7 (suelo/urea/zeolita). El análisis se hizo para los 3 macronutrientes necesarios por las plantas N-P-K

La prueba de potasio se descarta pues el análisis *T Student* requiere que los datos presenten normalidad y según la prueba *Shapiro-Wilks*, para el potasio no se tienen datos normalizados. Respecto al fósforo se encuentra diferencia significativa ($p \leq 0,05$) entre el conjunto zeolita Vs el tratamiento 2 (suelo/zeolita). Se da una mayor absorción de este elemento en los tratamientos del complejo zeolita. Con el tratamiento 1 y 3 no se encuentran diferencias significativas ($p \geq 0,05$).

Se encuentra que el cultivo fijó más nitrógeno en los tratamientos 2, 3 y el complejo zeolita, respecto al tratamiento 1 (testigo), lo cual es un resultado sin mayor relevancia, pues en este tratamiento la planta fijó el nitrógeno proveniente del sistema edáfico, por lo tanto, la menor presencia de este elemento concuerda con las especificaciones del proyecto. Ahora, entre tratamiento 2-3-complejo zeolita, no se dan diferencias significativas ($p \geq 0,05$) en cuanto a consumo de N. Aun así, el tratamiento que marca diferencia, es el

tratamiento 2, pues este consistió en la adición de la zeolita sin el fertilizante, lo cual corrobora todos los análisis realizados anteriormente: este material biodispone los elementos propios del suelo, mejorando sus características edáficas, y por ende incrementando su fertilidad natural (química).

5.2.3- Aprovechamiento del fertilizante

El anexo XVII contiene en análisis de varianza de los resultados obtenidos del aprovechamiento del fertilizante mostrados en el cuadro 12 como Nddf y Ndds, nitrógeno derivado del fertilizante y nitrógeno derivado del suelo respectivamente.

Al realizar dicho análisis, no se encuentran diferencias significativas ($p \geq 0,05$) entre el testigo (en este caso el tratamiento 3 suelo/urea) y los tratamientos 4, 5, 6 y 7 (urea combinada con 15, 25, 35 y 50% de zeolita respectivamente). Pero el mismo análisis de los resultados demuestra que el desarrollo del cultivo en cuanto a la fijación del nitrógeno, se da por las condiciones edáficas del sistema, pues el porcentaje de aprovechamiento del nitrógeno proviene en más del 90% del mismo. Menos del 10% del nitrógeno aprovechable por las plantas corresponde al nitrógeno que proviene de la urea, resultado que concuerda con lo expuesto por González *et al* (2007).

Los resultados pueden deberse a pérdidas del fertilizante en su medio natural, sin embargo, queda claro el efecto potenciador de la zeolita en las características edáficas del suelo en estudio, pues este material biodispone los otros elementos necesarios para el desarrollo del cultivo, mejora la capacidad de intercambio catiónico del sistema así como las relaciones de los cationes del complejo de cambio en la zona radicular, otorgándole al suelo las condiciones idóneas para que el pasto obtenga los nutrientes necesarios para su crecimiento.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

El nitrógeno total, el fósforo, calcio y magnesio incrementaron sus valores significativamente al emplear la zeolita, donde los tratamientos en los que se adicionó 35 y 50% de zeolita presentan los mejores resultados.

Los ensayos realizados y los resultados obtenidos dejan en claro que las propiedades naturales del sistema edáfico mejoran significativamente al emplear las zeolitas. Se incrementan significativamente las relaciones catiónicas Ca+Mg+K, Ca/K, Mg/K, (Ca+Mg)/K y ClCe. Nuevamente los tratamientos en los que se adicionó 35 y 50% de zeolita presentan los mejores resultados.

Los suelos de los tratamientos donde se empleó la zeolita, según las referencias de análisis de suelos, son considerados como suelos de fertilidad media.

Contrariamente al análisis de suelos, el análisis del vigor no presenta diferencias significativas tratamiento por tratamiento. No así el análisis complementario, donde se determinó que el conjunto zeolita tuvo efecto en el crecimiento de las plantas respecto al testigo. Se presentan plantas con mejor crecimiento orthotrópico en el conjunto zeolita.

Del análisis complementario de la nutrición foliar, se demuestra que el uso de zeolita biodispone de mejor manera los elementos nutricionales en la zona edáfica, pues hay diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre el tratamiento suelo/planta y el tratamiento suelo/zeolita, ambos sin fertilización nitrogenada.

Los resultados obtenidos de las técnicas isotópicas demuestran que el nitrógeno que obtuvo la planta para su desarrollo, lo adquirió del sistema edáfico pues $N_{dds} > N_{ssf}$, aproximadamente $90\% > 10\%$, demostrando la mejoría de la estructura edáfica obtenida al implementar el uso de zeolitas. Se determina entonces, que el uso de zeolitas tienen un efecto mejorador sobre las propiedades químicas del suelo, en este caso un ultisol y en especial la disposición de elementos esenciales, como N, P, K, Ca y Mg.

De los resultados de las técnicas isotópicas del ^{15}N , no se logra determinar que tratamiento optimiza el aprovechamiento del fertilizante por parte de las plantas por la fertilidad natural del suelo de la parcela experimental, aunque se puede inferir que el hecho de adicionar un material silicatado y de óptimas calidades, como la zeolita natural, se favorece los procesos de intercambio iónico en el suelo y, por ende, un impacto positivo sobre la nutrición vegetal.

6.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda ejecutar este tipo de investigación en un suelo con condiciones agrícolas intensas, con síntomas de degradación y topografías que propicien escorrentía con velocidades erosivas, con el fin de ver las mejoras que se den en el sistema edáfico por el uso de zeolitas.

Igualmente se debe considerar efectuar esta clase de investigación preferiblemente sobre monocultivos con referencias de impacto negativo en el ambiente y de alto consumo de sales nitrogenadas, como la piña, un cultivo característico de la región y de gran importancia económica en el país.

Incluir otros análisis de suelos como análisis físicos como densidad aparente, relaciones gravimétricas, y biológicos como contenido de materia orgánica,

respiración microbiana, entre otros, para determinar si efectivamente el uso de zeolitas no tiene efecto en el contenido de M.O.

Analizar posibles yacimientos de zeolita natural en Costa Rica y realizar investigaciones con las mismas, para evaluar su efecto mejorador sobre el suelo y con cultivos de importancia económica y social.

Establecer ensayos complementarios con materiales orgánicos combinado con zeolita natural para comprobar el efecto de la capacidad de intercambio iónico que poseen estos materiales.

Profundizar sobre el comportamiento hídrico entre de las zeolitas y el agua de los suelos (sistemas de riego).

Emplear distintas dosis de fertilización, donde lotes sean fertilizados con dosis altas, otros con dosis reguladas, y los últimos con dosis menores previamente calculadas, en cumplimiento a análisis previos de fertilidad de suelos.

Además del uso agropecuario, se debe considerar a la zeolita, su capacidad de adsorción de metales, nitratos y fosfatos, por lo que sería viable su utilización en temas de contaminación hídrica, en niveles freáticos y subterráneos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, R. 1995. Fertilizantes y pastoreo rotacional: dos técnicas para alta producción de leche y carne. CAFESA. San José, Costa Rica, 75 p.
- Arias, A 1998. Suelos Tropicales. EUNED. San José, Costa Rica. p182.
- Bertsch, F. 1987. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica 2ª ed. EUCR, San José, 78 p.
- Bertsch, F. 1995. La fertilidad de los suelos y su manejo, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo San José, C.R. 157 p.
- Brenes, J. 2009. Estudio técnico-económico del uso de tipos de fertilización en el pasto de corta Maralfalfa (*Pennisetum sp*), Tesis Lic. Cartago CR: ITCR, Escuela de Ingeniería Agropecuaria Administrativa, 39 p.
- Cabalceta, G. 1999. Fertilización y nutrición de forrajes de altura. XI Congreso nacional agronómico, III congreso nacional de suelos 1999. (en línea). Consultado 21 marzo, 2013. Disponible en: http://www.mag.go.cr/congreso_agronomico_xi/a50-6907-III_239.pdf
- Chávez, M. 2012. Relaciones catiónicas y su importancia para la agricultura, Revista Ventana Lechera, Costa Rica, N°18: 10-20.
- Chacón, A. Montenegro, J. Sasa, J. 2009. Inventario nacional de gases con efecto invernadero y absorción de carbono en Costa Rica en el 2000 y 2005. Ministerio del Ambiente, Energía y Telecomunicaciones, Instituto Meteorológico Nacional. (en línea). Consultado el 20 de marzo, 2014. Disponible en: http://cglobal.imn.ac.cr/sites/default/files/documentos/inventario_gases_efecto_invernadero.pdf
- Coello, H. Osorio, L. 2003. Estudio comparativo de fertilización orgánica y química en mezcla con zeolita en el cultivo de pimiento (*Capsicum anhum L.*) en la zona de Quevedo, Tesis Ing. Agr. Quevedo, Ecuador, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, 63 p. (en línea). Consultado 19 marzo, 2013. Disponible en: http://www.uteq.edu.ec/revista_cyt/archivos/2009/v2_01/articulo_1.pdf
- Correa, HJ. Arroyave, H. Henao, Y. López A. Cerón, J. 2002, Maralfalfa: Mitos y realidades. En: Despertar lechero. Volumen 22 (1), P79-88.

- Cunuhay, J. Choloquina, M. 2011. Evaluación de la adaptación del pasto Maralfalfa (*Pennisetum sp*), en dos pisos altitudinales con tres distancias de siembra en el campus Juan Lunardi y Naste del cantón Paute. Tesis Lic. Paute Ecuador: UPS. Facultad de Ingeniería Agropecuaria y Ambientales. 251 p. (en línea). Consultado el 10 de enero, 2014. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1088/15/UPS-CT002046.pdf>
- Espinoza, L. Slaton. N. Mozaffari, M. 2012. Como interpretar los resultados de los análisis de suelos. Universidad de Arkansas. Extensión Cooperativa. (en línea). Consultado 15 marzo, 2014. Disponible en: <http://www.uaex.edu/publications/pdf/FSA-2118SP.pdf>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura). 2008. Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos, (Estudio FAO Riego y Drenaje - 55). (en línea). Consultado 15 marzo, 2013. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/W2598S/w2598s00.htm#Contents>
- González, C. Estavillo, J.M^a. González, M. González, A. Pinto, M. Merino, M. Aizpurua A. 2007. Fertilización nitrogenada y sostenibilidad ambiental frente a producción y calidad. (en línea). Consultado 21 marzo, 2013. Disponible en: http://www.ikerkuntza.ehu.es/p273content/es/contenidos/informacion/vri_encuentos/es_vri_encu/adjuntos/4_GMurua_L.pdf
- González, M. Gómez, J. Muñiz, F. Valencia, D. Gutiérrez, H. Figueroa, N. 2012. Rendimiento del maíz de riego tratado con zeolita más fertilizante en el estado de Guerrero. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 3(6): 1129-1144.
- Gorki, C. Sánchez, F. Llerena, L. Váscquez, G. 2009. Empleo de zeolitas naturales en la fertilización y producción del fréjol (*phaseolus vulgaris L.*) en la zona de Quevedo. Revista Ciencia y Tecnología. Vol. 2. N°1. págs. 1-6 (en línea). Consultado 10 marzo, 2014, Disponible en: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4053183>
- Kass, D. 1996. Fertilidad de suelos. EUNED. San José, Costa Rica. p272
- Haro M.F. 2011. Zeolita natural: triple impacto para el sector agropecuario Ecuatoriano. (en línea). Consultado 21 marzo, 2013. Disponible en: <http://www.engormix.com/MA-agricultura/cultivos-tropicales/articulos/>
- Isquisa. 2013. Urea 46-00-00. (en línea). Consultado 11 octubre de 2013, Disponible en www.isquisa.com/site/files/productos/Urea.pdf

- Jiménez-Terry F, D. Agramonte, M. Pérez, M. Pons, M. León-Miranda, M. Rodríguez, M. González, M. León-Quintana, M. Acosta-Suárez, Y. Alvarado Capó, M. 2011. Conservación de minitubérculos de papa con el uso de zeolita en polvo. *Biotecnología Vegetal (Cuba)* 11(2): 89 – 98.
- Leiva Gómez, J. 2010. Zeolita natural como mejoramiento de suelos y optimización de fertilizantes. CDC Commodity Holdings Group. México. (en línea). Consultado 14 marzo, 2013. Disponible en: <http://www.engormix.com/MA-ganaderialeche/articulos/zeolita-natural-mejoramiento-de-suelos-t2958/p0.htm>
- MAG (Ministerio Agricultura y Ganadería). 1997. Buenas Prácticas Agropecuarias BPA. Costa Rica. 15(86). (en línea). Consultado 15 marzo 2013. Disponible en: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a00136.pdf>
- Meléndez, G. Molina, E. 2003. Fertilizantes y características de manejo. Centro de Investigaciones Agronómicas. Universidad de Costa Rica. p4-35. (en línea). Consultado 15 marzo, 2014. Disponible en: <http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/Memorias/Memoria%20Curso%20Fertilizantes.pdf>
- Méndez J., Bertsch F. 2012. Guía para la interpretación de suelos de Costa Rica. San José, Costa Rica. Asociación costarricense de la ciencia del suelo. p. 25-104.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 2012. Insumos y factores asociados a la producción agropecuaria. Colombia. Setiembre. N°12. p1-5. (en línea). Consultado 03 marzo, 2014. Disponible en: http://www.agronet.gov.co/www/htm3b/public/boletines/InsumosDane/insumos_factores_de_produccion_septiembre_2012.pdf
- Montalvo, H. Díaz, H. Valenzuela, R. Umpierrez, C. 1991. Memorias de la 3ra. Conferencia Internacional sobre Ocurrencia. Propiedades y Usos de las Zeolitas Naturales. Habana, CU. p74.
- Montenegro, J. 2003. El cambio climático y el sector agropecuario costarricense. INTA/MAG-IMN. San José.
- Mumpton, F. A. 1984. Natural zeolites: in zeo-agriculture: use of natural zeolites in Agriculture and acuaculture. W.G. Pond and F.A. Mumpton. ed. Westview Press,. Boulder, Colorado. p33-43.
- Muñoz, R. 2012. Manual de laboratorio de edafología. EUNED. San José, Costa Rica.

- Ospina, I. 2009. Ficha técnica: Urea. Colombia. (en línea). Consultado 19 marzo, 2014. Disponible en: <http://69.167.133.98/~dqisaco/pdf/UREA.pdf>
- Peña, C. Grageda, O. Vera, J. 2002. Manejo de los fertilizantes nitrogenados en México: uso de las técnicas isotópicas (^{15}N). (en línea). Consultado 19 marzo, 2014. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57320109>
- Peña, W. 2012. Edafología para el trópico. EUNED. San José, Costa Rica (preliminar).
- Ramírez, R. Londoño I. Ochoa, J. Morales, M. 2006. Evaluación del pasto Maralfalfa (*Pennisetum sp.*) como recuperador de un andisol degradado por las practicas. Antioquia, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. p25.
- Rodríguez, F. 2005. Uso del suelo, prácticas culturales, sistemas productivos y sostenibilidad en las fincas de la sub-cuenca del río Tres Amigos, cuenca del río San Carlos. Revista Pensamiento Actual, de la Universidad de Costa Rica. Vol. 5, N°6. pp 23-31.
- UNED (Universidad Estatal a Distancia). 2008. Informe de proyecto: Agricultura urbana-rural conservacionista. Diagnóstico general de la región San Carlos, vinculado al CITTED-La Perla. Escuela de Ciencias Exactas y Naturales. Cátedra Gestión Sostenible del Suelo
- Vizcaino, B. 1998. Identificación y caracterización de la zeolita natural tipo Clinoptilolita. Tesis MSc. Nuevo León, México: Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas. p72. (en línea). Consultado el 15 de febrero, 2014. Disponible en: <http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020124779.pdf>

8. ANEXOS

ANEXO I. Países miembros del Acuerdo Regional de Cooperación para la Promoción de la Ciencia y la Tecnología Nuclear en América Latina y el Caribe, ARCAL

PAIS	Fecha firma del Acuerdo	Fecha ratificación del Acuerdo
Argentina	4 de diciembre de 1998	
Bolivia	25 de septiembre de 1998	
Brasil	4 de agosto de 1999	
Chile	25 de septiembre de 1998	
Colombia	11 de diciembre de 1998	
Costa Rica	25 de septiembre de 1998	15 de octubre de 2001
Cuba	25 de septiembre de 1998	4 de setiembre de 2002
Ecuador	25 de septiembre de 1998	24 de octubre de 2001
El Salvador	19 de enero de 2001	3 de diciembre de 2001
Guatemala	25 de septiembre de 1998	
Jamaica		
México	11 de mayo de 1999	7 de agosto de 2000
Nicaragua	30 de mayo de 2001	
Panamá	15 de junio de 2001	22 de marzo de 2002
Paraguay	25 de septiembre de 1998	
Perú	20 de octubre de 1998	28 de marzo de 2001
Republica Dominicana		
Uruguay	25 de septiembre de 1998	
Venezuela	29 de octubre de 1998	2 de mayo de 2002

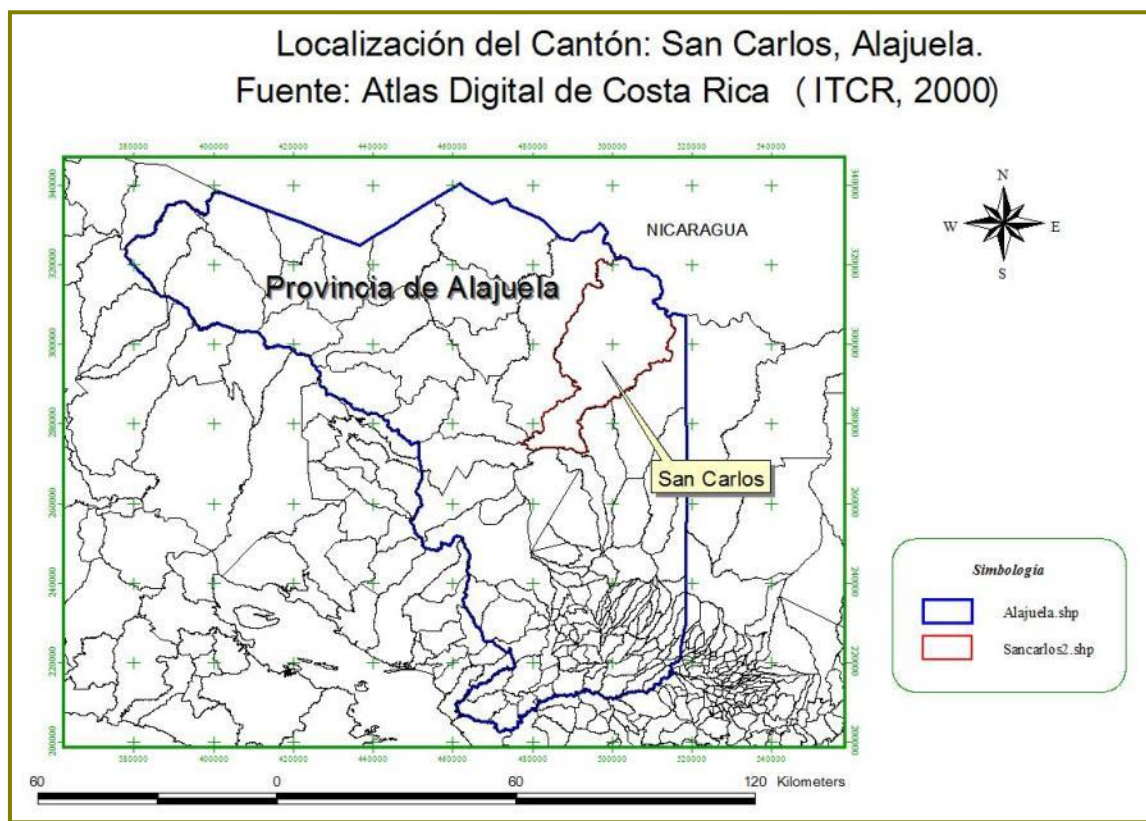
Fuente: <http://arc.cnea.gov.ar/quees/como.asp>

ANEXO II. Ficha técnica del fertilizante nitrogenado urea

FICHA TÉCNICA	
ÚREA	
IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO	
Nombre Químico	Urea
Fórmula Química	CO (NH ₂) ₂
Peso Molecular	60 g/mol.
Sinónimos	Carbamida, carbonildiamida o ácido carbamídico
ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO	
Nitrógeno total (b.s)	Min. 44 %
Nitrógeno Orgánico (b.s)	Min. 44 %
Humedad	Max. 2 %
Aspecto	Estandar
PROPIEDADES	
Apariencia	Polvo o cristales
Color	Blanco
Olor	casi inodoro
Sabor	Salino
Peso Especifico	1.335
Densidad	768 Kg/m ³
Punto de Fusión	132.7 ° C
Acidez equivalente a carbonato de calcio	84 partes de carbonato por 100 de urea

Fuente: (Ospina, 2009)

ANEXO III. Ubicación del Cantón de San Carlos en la provincia de Alajuela



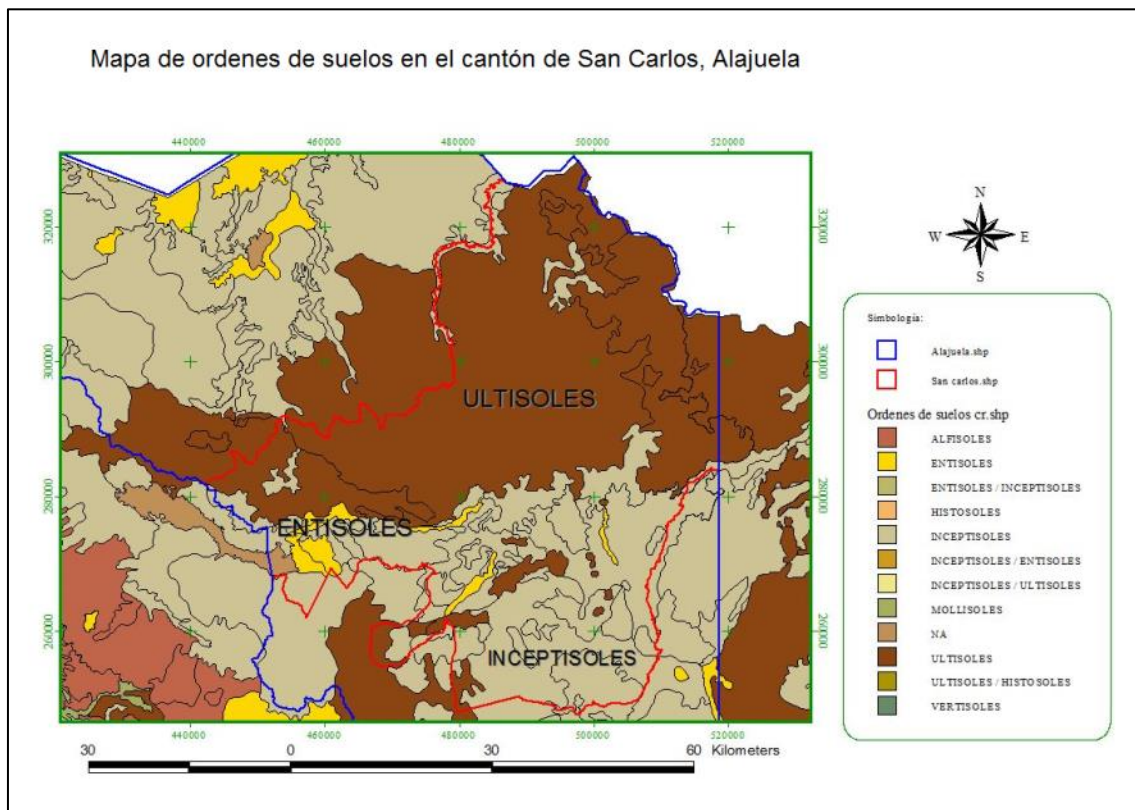
Fuente: ATLAS Digital de Costa Rica (ITCR, 2000)

ANEXO IV. Distritos que se dedican a la ganadería en la Región Huetaar Norte, áreas dedicadas al pastoreo unidades de animales por hectárea

Tabla No.1. Carga animal por distrito, Región Huetaar Norte			
Provincia, cantón y distrito	Área pastoreo (ha)	UA	Carga animal (UA/ha)
ALAJUELA			
San Carlos	133629	184657	1.38
Palmera	3226	6877	2.13
Aguas Zarcas	6518	13765	2.11
Veneda	3457	7062	2.04
Fortuna	7938	14557	1.83
Florencia	6021	9573	1.59
Quesada	6771	10639	1.57
Pital	12343	18386	1.49
Buena Vista	1364	1934	1.42
Monterrey	19446	25671	1.32
Venado	9205	11428	1.24
Cutris	23795	27743	1.17
Pocosol	32001	35676	1.11
Tigra	1544	1346	0.87
Los Chiles	38599	47059	1.22
San Jorge	16754	22132	1.32
El Amparo	8369	10141	1.21
Caño Negro	5274	6002	1.14
Los Chiles	8202	8784	1.07
Guatuso	35851	40802	1.14
Buenavista	11704	13802	1.18
San Rafael	19248	22246	1.16
Cote	4899	4754	0.97
Upala	60093	62519	1.04
Delicias	3846	4662	1.21
Bijagua	5417	6199	1.14
Aguas Claras	13330	14984	1.12
Upala	11113	12219	1.10
San José	12730	14053	1.10
Dos Ríos	5238	4036	0.77
Yolillal	8419	6366	0.76
San Ramón			
Peñas Blancas	2388	3174	1.33
Grecia			
Río Cuarto	12664	16069	1.27
Alajuela			
Sarapiquí	1926	2077	1.08
HEREDIA			
Sarapiquí	49601	57629	1.16
Horquetas	12448	17742	1.43
Cureña	3985	4815	1.21
La Virgen	15576	17129	1.10
Puerto Viejo	17592	17943	1.02
Llanuras de Gaspar	ND	ND	ND

Fuente: Censo ganadero 2000, CORFOGA

ANEXO V. Órdenes de suelos en el cantón de San Carlos, Alajuela



Fuente: ATLAS Digital de Costa Rica (ITCR, 2000)

ANEXO VI. Guía para interpretar un análisis de suelos

Parámetro	Unidades	Valores medios
pH	--	5,5-6,5
Acidez intercambiable		0,3-1,0
Ca	cmol(+)·l ⁻¹	4-6
Mg		1-3
K		0,2-0,5
Relaciones catiónicas		
ClCe		5-25
Suma cationes		5-12
Ca/Mg	cmol(+)·l ⁻¹	2-5
Ca/K		5-25
Mg/K		2,5-15
{Ca+Mg}/K		10-40
Saturación de acidez		10-30
N	%	0,6-1,0
MOS		2-5
P		12-20
Fe		5-10
Mn		5-10
Cu	mg·l ⁻¹	0,5-1
Zn		2-3
B		0,2-0,5
S		12-20
pH en agua 1 : 2,5		
Ca, Mg y acidez o Al extraíbles con KCl 1M, valor medio en Al interc.0,3 cmol(+)·l ⁻¹		
P, K, Fe, Cu, Zn y Mn extraíbles con Olsen modificado		
B y S extraíbles con fosfato de calcio		
*MOS = materia orgánica mediante digestión húmeda (K ₂ Cr ₂ O ₇ /K ₂ SO ₄), valor en ultiso les		
N: nitrógeno total mediante Kjendahl o plasma		

Fuente: (Muñoz y Peña, 2012)



ANEXO VII. Niveles críticos para la interpretación de análisis de suelos en Costa Rica adaptados a los criterios del MAG y el CATIE

Características	Categoría		
	Baja	Media	Alta
pH agua 1:2,5	< 5,5	5,6 – 6,5	> 6,5
Acidez (cmol (+)/L)	< 0,5	0,5 – 1,5	> 1,5
Saturación de Acidez (%)	< 10	10 – 50	> 50
Suma de Bases (cmol (+)/L)	< 5	5 – 25	> 25
CICE (cmol (+)/L)	< 5	5 – 25	> 25
Ca (cmol (+)/L)	< 4	4 – 20	> 20
Mg (cmol (+)/L)	< 1	1 – 5	> 5
K (cmol (+)/L)	< 0,2	0,2 – 0,6	> 0,6
P (mg/L)	< 10	10 – 20	> 20
Zn (mg/L)	< 2	2 – 10	> 10
Mn (mg/L)	< 5	5 – 50	> 50
Fe (mg/L)	< 10	10 – 100	> 100
Cu (mg/L)	< 2	2 - 20	> 20
Relación	Desbalance	Balance	Desbalance
Ca/Mg	< 2	2 - 5	> 5
Ca/K	< 5	5 – 25	> 25
Mg/K	< 2,5	2,5 – 15	> 15
Ca+Mg/K	< 10	10 - 40	> 40

Relación	Categoría		
	Deficiente	Nivel Crítico	Óptimo
Ca/Mg	0,2	1,2	1,9 - 6,2
Ca/K	--	--	--
Mg/K	0,2	1,6	3,6 - 14
Ca+Mg/K	0,2	3,5	10 - 60


Fuente: (Bertsch, 1987, Díaz Romeu y Hunter 1978)

ANEXO VIII. Análisis de suelos del INTA. Micro y macro elementos

 <p>inta Costa Rica Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria</p>		<p>RESULTADOS DE ANÁLISIS DE SUELOS Laboratorio de Suelos Tel-Fax: 2279-7052 e-mail: labsuelos@inta.go.cr</p>				 <p>sector AGRO ALIMENTARIO</p>		LDS F 17				
NOMBRE: MANUEL PEREZ MARIN						FECHA: 11-Nov-13						
UBICACIÓN:												
FAX:						INFORME #:						
NUMERACION		pH	cmol(+)/l				mg/l					IDENTIFICACION
# LAB.	#CAMPO		Acidez	Ca	Mg	K	P	Zn	Mn	Cu	Fe	
3298	4	5.5	0.25	7.1	2.8	0.87	3	5.3	46	9	33	
3299	5	5.5	0.15	7.20	4.50	0.33	3	2.6	20	3	10	
3300	6	5.5	0.25	7.50	3.10	0.35	4	3.8	145	7	23	
3301	7	5.4	0.20	7.30	2.70	0.25	4	7.4	80	11	49	
			%M.O									
			3.01									
			2.72									
			3.01									
			1.51									
										Ing. Alexis Vargas Villagra		

Fuente: (INTA, 2013)

ANEXO IX. Análisis de suelos de CAFESA. Nitrógeno total


INFORME DE ANALISIS DE SUELO

FECHA: 11/4/2013

CLIENTE: UNED

PROVINCIA: Alajuela CANTON: San Carlos DISTRITO: La Perla

CULTIVO: Maralfalfa



No. Lab.	Identificación de Campo	% Nitrógeno Total
S-3028-13 # 4		1.02
S-3029-13 # 5		1.01
S-3030-13 # 6		1.02
S-3031-13 # 7		1.03

Atentamente;

Ing. Marco V. Corrales Soto
JEFE, LABORATORIO CAFESA

Fuente: (CAFESA, 2013)

ANEXO X. Análisis foliar del INTA. Químico completo

 <small>Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria</small>		RESULTADOS DE ANALISIS FOLIARES Laboratorio de Suelos e-mail: labsuelos@inta.go.cr					 sector AGRO ALIMENTARIO				
NOMBRE UNED(-CETTED-SAN CARLOS MANUEL PEREZ-WAGNER PASTO MARAFALFA							FECHA: 18-OCTUBRE-2013 INFORME #:				
FAX:											
IDENT.		%					mg/kg				IDENTIFICACIÓN
# LAB.	# CAMPO	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Zn	Mn	Fe	
735	1A	2.66	0.29	3.05	0.48	0.22	11	73	87	501	
736	2A	2.72	0.31	3.31	0.45	0.15	11	42	81	419	
737	3A	2.60	0.29	3.07	0.59	0.22	11	43	114	607	
738	4A	2.81	0.31	3.23	0.47	0.18	10	36	93	459	
739	5A	2.83	0.34	3.42	0.55	0.24	11	39	96	686	
740	6A	2.86	0.36	3.06	0.44	0.19	12	41	93	585	
741	7A	2.74	0.31	3.21	0.44	0.16	10	40	102	365	
742	1B	2.63	0.29	3.08	0.42	0.17	9	38	97	212	
743	2B	2.72	0.24	3.95	0.51	0.21	8	37	87	234	
744	3B	2.71	0.27	3.04	0.37	0.17	9	39	83	709	
745	4B	2.53	0.28	2.82	0.60	0.21	9	34	74	536	
746	5B	2.58	0.36	2.55	0.39	0.22	10	38	93	510	
747	6B	2.74	0.26	2.62	0.64	0.23	8	32	79	610	
748	7B	2.83	0.25	2.55	0.43	0.22	9	33	67	477	
749	1C	2.69	0.28	2.79	0.39	0.22	9	36	106	399	
750	2C	2.74	0.25	2.32	0.72	0.27	9	48	106	414	
751	3C	2.69	0.37	2.81	0.56	0.23	10	39	97	602	
752	4C	2.63	0.39	3.01	0.57	0.03	12	39	75	532	
753	5C	2.74	0.32	2.57	0.33	0.17	10	33	84	324	
754	6C	2.58	0.32	2.67	0.54	0.22	8	30	71	298	

Ing. Agr. Alexis Vargas Villagra

Fuente: (INTA, 2013)

ANEXO X (continuación). Análisis foliar del INTA. Químico completo

IDENT.		%					mg/kg				IDENTIFICACIÓN
# LAB.	# CAMPO	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Zn	Mn	Fe	
755	7C	2.66	0.30	2.54	1.62	0.19	7	29	88	449	
756	1D	2.74	0.37	3.04	0.57	0.27	9	39	93	296	
757	2D	2.66	0.36	3.10	0.65	0.26	9	30	103	503	
758	3D	2.80	0.42	2.85	0.68	0.33	8	34	98	511	
759	4D	2.77	0.39	3.27	1.07	0.28	8	35	67	283	
760	5D	2.86	0.26	2.86	1.52	0.36	7	32	108	453	
761	6D	2.72	0.26	2.71	0.86	0.23	6	32	80	428	
762	7D	2.74	0.29	2.54	0.53	0.19	8	25	69	516	

Ing. Agr. Alexis Vargas Villagra

Fuente: (INTA, 2013)

ANEXO XI. Resultados de trazador ^{15}N , ISOFYS

UNIVERSITEIT GENT		Faculty of Bioscience Engineering		ISOFYS Isotope Bioscience Laboratory		Faculty of Bioscience Engineering
						Department of Applied and Analytical Chemistry Isotope Bioscience Laboratory
						Operator: Katja Van Nieuland
Date of analysis:	December 16-17th					
State of analysis:	solid					
Kind of analysis:	$\delta^{15}\text{N}$	%N				
	$\delta^{13}\text{C}$	%C				
Amount of samples:	88					
Sample name	% N	$\delta^{15}\text{N}$ in ‰ versus Air	^{15}N in At%	% C	$\delta^{13}\text{C}$ in ‰ versus PDB	
WP-Maralfalfa 1	1.65	346.03	0.49	40.31	-11.58	
WP-Maralfalfa 2	1.74	132.36	0.41	39.61	-11.47	
WP-Maralfalfa 3	1.77	440.07	0.53	40.45	-11.49	
WP-Maralfalfa 4	1.86	386.89	0.51	40.93	-11.41	
WP-Maralfalfa 5	1.94	818.84	0.66	39.24	-11.40	
WP-Maralfalfa 6	1.70	531.83	0.56	39.96	-11.97	
WP-Maralfalfa 7	1.66	514.82	0.55	39.91	-11.61	
WP-Maralfalfa 8	2.04	314.09	0.48	40.65	-11.80	
WP-Maralfalfa 9	1.78	290.84	0.47	38.35	-11.61	
WP-Maralfalfa 10	2.22	469.95	0.54	41.15	-11.66	
WP-Maralfalfa 11	1.98	575.77	0.58	38.21	-11.44	
WP-Maralfalfa 12	1.89	391.22	0.51	38.85	-11.97	
WP-Maralfalfa 13	2.10	606.53	0.59	40.66	-11.64	
WP-Maralfalfa 14	2.00	646.53	0.60	41.25	-11.42	
WP-Maralfalfa 15	1.74	775.56	0.65	40.02	-11.44	
WP-Maralfalfa 16	1.91	555.49	0.57	37.32	-11.63	
WP-Maralfalfa 17	2.15	358.81	0.50	39.86	-11.83	
WP-Maralfalfa 18	2.11	673.73	0.61	39.89	-11.37	
WP-Maralfalfa 19	1.68	502.12	0.55	39.83	-12.20	
WP-Maralfalfa 20	2.17	397.45	0.51	40.13	-11.48	

Fuente: (ISOFYS, 2013)

ANEXO XII. Análisis estadístico T Student y prueba de normalidad para interpretación macro y micro elementos de suelos por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e

Prueba t para una media

Valor de la media bajo la hipótesis nula: .11

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
N	4	1.02	0.01	1.01	222.90	<0.0001

Prueba t para una media

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 2.68

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
M.O.	4	2.56	0.71	1.72	-0.33	0.6180

Prueba t para una media

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 5.5

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
pH	4	5.48	0.05	5.42	-1.00	0.8045

Prueba t para una media

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 0.25

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
Acidez	4	0.21	0.05	0.16	-1.57	0.8924

Prueba t para una media

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 6.80

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
Ca	4	7.28	0.17	7.07	5.56	0.0057

Prueba t para una media

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 2.10

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
Mg	4	3.28	0.83	2.29	2.82	0.0334

Prueba t para una media

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 0.82

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
K	4	0.45	0.28	0.12	-2.61	0.9602

ANEXO XII (continuación). Análisis estadístico T Student y prueba de normalidad para interpretación macro y micro elementos de suelos por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e

Prueba t para una media

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 2

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
P	4	3.50	0.58	2.82	5.20	0.0069

Prueba t para una media

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 7.2

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
Zn	4	4.78	2.07	2.34	-2.34	0.9496

Prueba t para una media

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 190

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
Mn	4	72.75	54.07	9.13	-4.34	0.9887

Prueba t para una media

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 10

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
Cu	4	7.50	3.42	3.48	-1.46	0.8803

Prueba t para una media

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 70

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
Fe	4	28.75	16.46	9.38	-5.01	0.9924

ANEXO XII (continuación). Análisis estadístico T Student y prueba de normalidad para interpretación macro y micro elementos de suelos por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
N	4	1.02	0.01	0.96	0.7298
M.O.	4	2.56	0.71	0.76	0.0535
pH	4	5.48	0.05	0.64	<0.0001
Acidez	4	0.21	0.05	0.85	0.2462
Ca	4	7.28	0.17	0.97	0.8212
Mg	4	3.28	0.83	0.80	0.0987
K	4	0.45	0.28	0.77	0.0695
P	4	3.50	0.58	0.70	0.0118
Zn	4	4.78	2.07	0.98	0.8564
Mn	4	72.75	54.07	0.95	0.7178
Cu	4	7.50	3.42	0.97	0.8212
Fe	4	28.75	16.46	1.00	0.9738

ANEXO XIII. Análisis estadístico T Student y prueba de normalidad para interpretación de las relaciones catiónicas de suelos por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e

Prueba t para una media

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 9.72

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
Ca+Mg+K	4	11.00	0.75	10.12	3.42	0.0209

Prueba t para una media

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 3.24

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
Ca/Mg	4	2.32	0.49	1.74	-3.77	0.9837

Prueba t para una media

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 8.29

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
Ca/K	4	20.15	8.76	9.85	2.71	0.0366

Prueba t para una media

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 2.56

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
Mg/K	4	9.13	4.40	3.95	2.99	0.0292

Prueba t para una media

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 10.85

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
(Ca+Mg)/K	4	29.28	12.58	14.48	2.93	0.0305

Prueba t para una media

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 9.97

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
CICe	4	11.21	0.72	10.37	3.45	0.0204

Prueba t para una media

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 2.51

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
S.A.	4	1.91	0.48	1.34	-2.49	0.9559

Prueba t para una media

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 97.49

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
V	4	98.09	0.48	97.52	2.49	0.0441

ANEXO XIII (continuación). Análisis estadístico T Student y prueba de normalidad para interpretación de las relaciones catiónicas de suelos por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Ca+Mg+K	4	11.00	0.75	0.94	0.6541
Ca/Mg	4	2.32	0.49	0.84	0.2002
Ca/K	4	20.15	8.76	0.93	0.5784
Mg/K	4	9.13	4.40	0.97	0.7990
(Ca+Mg) /K	4	29.28	12.58	0.89	0.4092
CICe	4	11.21	0.72	0.96	0.7686
S.A.	4	1.91	0.48	0.85	0.2213
V	4	98.09	0.48	0.85	0.2213

ANEXO XIV. Análisis estadístico T Student y prueba de normalidad para la comparación de los tamaños de las plantas obtenidos en los tratamientos 1,2 y 3 Vs el tratamiento zeolita como conjunto por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e

Prueba t para una media TAMAÑO 1

Comparación con tamaño promedio del tratamiento 1

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 1.89

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
Tamaño 1	4	1.99	0.04	1.95	5.31	0.0065

Comparación con tamaño promedio del tratamiento 2

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 1.98 Tamaño tratamiento 1

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
Tamaño 1	4	1.99	0.04	1.95	0.65	0.2818

Comparación con tamaño promedio del tratamiento 3

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 2.01

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
Tamaño 1	4	1.99	0.04	1.95	-0.91	0.7842

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Tamaño 1	4	1.99	0.04	0.95	0.6961

Prueba t para una media TAMAÑO 2

Comparación con tamaño promedio del tratamiento 1

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 4.16

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
Tamaño 2	4	4.40	0.09	4.29	5.10	0.0073

Comparación con tamaño promedio del tratamiento 2

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 4.30

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
Tamaño 2	4	4.40	0.09	4.29	2.12	0.0619

Comparación con tamaño promedio del tratamiento 3

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 4.12

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
Tamaño 2	4	4.40	0.09	4.29	5.95	0.0048

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Tamaño 2	4	4.40	0.09	0.97	0.8086

ANEXO XV. Análisis estadístico ANDEVA para el químico completo del pasto Maralfalfa, por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
N	28	0.29	0.00	3.28

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0.06	9	0.01	0.81	0.6173
Bloque	0.04	3	0.01	1.64	0.2158
Tratamiento	0.02	6	3.1E-03	0.39	0.8767
Error	0.14	18	0.01		
Total	0.20	27			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.20809

Error: 0.0079 gl: 18

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
1.00	2.68	4	0.04	A
4.00	2.69	4	0.04	A
3.00	2.70	4	0.04	A
2.00	2.71	4	0.04	A
6.00	2.73	4	0.04	A
7.00	2.74	4	0.04	A
5.00	2.75	4	0.04	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p<= 0.05)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
P	28	0.36	0.05	15.39

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0.02	9	2.6E-03	1.14	0.3849
Bloque	0.01	3	4.1E-03	1.76	0.1916
Tratamiento	0.01	6	1.9E-03	0.84	0.5583
Error	0.04	18	2.3E-03		
Total	0.07	27			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.11225

Error: 0.0023 gl: 18

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
7.00	0.29	4	0.02	A
2.00	0.29	4	0.02	A
6.00	0.30	4	0.02	A
1.00	0.31	4	0.02	A
5.00	0.32	4	0.02	A
3.00	0.34	4	0.02	A
4.00	0.34	4	0.02	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p<= 0.05)

ANEXO XV (continuación). Análisis estadístico ANDEVA para el químico completo del pasto Maralfalfa, por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e

Variable	N	R²	R² Aj	CV
K	28	0.50	0.26	10.14

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	1.62	9	0.18	2.04	0.0952
Bloque	0.95	3	0.32	3.59	0.0341
Tratamiento	0.67	6	0.11	1.26	0.3243
Error	1.59	18	0.09		
Total	3.21	27			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.69417

Error: 0.0883 gl: 18

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
7.00	2.71	4	0.15	A
6.00	2.77	4	0.15	A
5.00	2.85	4	0.15	A
3.00	2.94	4	0.15	A
1.00	2.99	4	0.15	A
4.00	3.08	4	0.15	A
2.00	3.17	4	0.15	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

Variable	N	R²	R² Aj	CV
Ca	28	0.33	0.00	50.07

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0.85	9	0.09	0.98	0.4901
Bloque	0.62	3	0.21	2.13	0.1317
Tratamiento	0.23	6	0.04	0.40	0.8700
Error	1.74	18	0.10		
Total	2.59	27			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.72660

Error: 0.0967 gl: 18

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
1.00	0.47	4	0.16	A
3.00	0.55	4	0.16	A
2.00	0.58	4	0.16	A
6.00	0.62	4	0.16	A
4.00	0.68	4	0.16	A
5.00	0.70	4	0.16	A
7.00	0.76	4	0.16	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

ANEXO XV (continuación). Análisis estadístico ANDEVA para el químico completo del pasto Maralfalfa, por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Mg	28	0.49	0.23	24.54

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0.05	9	0.01	1.91	0.1153
Bloque	0.03	3	0.01	3.90	0.0262
Tratamiento	0.02	6	2.6E-03	0.92	0.5027
Error	0.05	18	2.8E-03		
Total	0.10	27			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.12367

Error: 0.0028 gl: 18

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
4.00	0.18	4	0.03	A
7.00	0.19	4	0.03	A
6.00	0.22	4	0.03	A
1.00	0.22	4	0.03	A
2.00	0.22	4	0.03	A
3.00	0.24	4	0.03	A
5.00	0.25	4	0.03	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p<= 0.05)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Cu	28	0.64	0.46	11.94

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	38.93	9	4.33	3.57	0.0103
Bloque	32.71	3	10.90	9.01	0.0007
Tratamiento	6.21	6	1.04	0.86	0.5449
Error	21.79	18	1.21		
Total	60.71	27			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=2.57056

Error: 1.2103 gl: 18

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
6.00	8.50	4	0.55	A
7.00	8.50	4	0.55	A
2.00	9.25	4	0.55	A
5.00	9.50	4	0.55	A
3.00	9.50	4	0.55	A
1.00	9.50	4	0.55	A
4.00	9.75	4	0.55	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p<= 0.05)

ANEXO XV (continuación). Análisis estadístico ANDEVA para el químico completo del pasto Maralfalfa, por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e

Variable	N	R²	R² Aj	CV
Zn	28	0.58	0.38	18.02

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	1143.00	9	127.00	2.80	0.0300
Bloque	587.57	3	195.86	4.32	0.0184
Tratamiento	555.43	6	92.57	2.04	0.1122
Error	815.43	18	45.30		
Total	1958.43	27			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=15.72660

Error: 45.3016 gl: 18

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
7.00	31.75	4	3.37	A
6.00	33.75	4	3.37	A
5.00	35.50	4	3.37	A
4.00	36.00	4	3.37	A
3.00	38.75	4	3.37	A
2.00	39.25	4	3.37	A
1.00	46.50	4	3.37	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

Variable	N	R²	R² Aj	CV
Mn	28	0.50	0.26	12.77

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	2356.32	9	261.81	2.03	0.0963
Bloque	534.11	3	178.04	1.38	0.2810
Tratamiento	1822.21	6	303.70	2.35	0.0744
Error	2322.64	18	129.04		
Total	4678.96	27			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=26.54196

Error: 129.0357 gl: 18

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
4.00	77.25	4	5.68	A
6.00	80.75	4	5.68	A
7.00	81.50	4	5.68	A
2.00	94.25	4	5.68	A
5.00	95.25	4	5.68	A
1.00	95.75	4	5.68	A
3.00	98.00	4	5.68	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

ANEXO XV (continuación). Análisis estadístico ANDEVA para el químico completo del pasto Maralfalfa, por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e

Variable	N	R²	R² Aj	CV
Fe	28	0.43	0.15	25.75

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	195201.00	9	21689.00	1.54	0.2090
Bloque	37081.57	3	12360.52	0.88	0.4720
Tratamiento	158119.43	6	26353.24	1.87	0.1422
Error	254021.43	18	14112.30		
Total	449222.43	27			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=277.57283

Error: 14112.3016 gl: 18

Tratamiento	Medias	n	E.E.
1.00	352.00	4	59.40 A
2.00	392.50	4	59.40 A
7.00	451.75	4	59.40 A
4.00	452.50	4	59.40 A
6.00	480.25	4	59.40 A
5.00	493.25	4	59.40 A
3.00	607.25	4	59.40 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

ANEXO XVI. Análisis estadístico T Student y prueba de normalidad para la comparación de los macroelementos N-P-K, (tratamientos 1, 2 y 3) Vs el tratamiento zeolita como conjunto (tratamientos 4, 5, 6 y 7) por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e

Prueba t para una media NITRÓGENO

Comparación con nitrógeno promedio del tratamiento 1

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 2.68

Variable	n	Media	DE	LI (95)	T	p (Unilateral D)
N	16	2.73	0.10	2.68	1.78	0.0476

Comparación con nitrógeno promedio del tratamiento 2

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 2.71

Variable	n	Media	DE	LI (95)	T	p (Unilateral D)
N	16	2.73	0.10	2.68	0.63	0.2705

Comparación con nitrógeno promedio del tratamiento 3

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 2.70

Variable	n	Media	DE	LI (95)	T	p (Unilateral D)
N	16	2.73	0.10	2.68	1.01	0.1642

Prueba t para una media FÓSFORO

Comparación con fósforo promedio del tratamiento 1

Valor de la media bajo la hipótesis nula: .31

Variable	n	Media	DE	LI (95)	T	p (Unilateral D)
P	16	0.31	0.05	0.29	0.22	0.4148

Comparación con fósforo promedio del tratamiento 2

Valor de la media bajo la hipótesis nula: .29

Variable	n	Media	DE	LI (95)	T	p (Unilateral D)
P	16	0.31	0.05	0.29	1.97	0.0338

Comparación con fósforo promedio del tratamiento 2

Valor de la media bajo la hipótesis nula: .34

Variable	n	Media	DE	LI (95)	T	p (Unilateral D)
P	16	0.31	0.05	0.29	-2.41	0.9853

ANEXO XVI (continuación). Análisis estadístico T Student y prueba de normalidad para la comparación de los macroelementos N-P-K, (tratamientos 1, 2 y 3) Vs el tratamiento zeolita como conjunto (tratamientos 4, 5, 6 y 7) por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e

Prueba t para una media POTASIO

Comparación con potasio promedio del tratamiento 1

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 2.99

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
K	16	2.85	0.31	2.72	-1.81	0.9546

Comparación con potasio promedio del tratamiento 2

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 3.17

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
K	16	2.85	0.31	2.72	-4.16	0.9996

Comparación con potasio promedio del tratamiento 2

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 2.94

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
K	16	2.85	0.31	2.72	-1.15	0.8666

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
N	16	2.73	0.10	0.90	0.1590
P	16	0.31	0.05	0.90	0.1724
K	16	2.85	0.31	0.84	0.0146

ANEXO XVII. Análisis estadístico ANDEVA de los resultados de aprovechamiento del nitrógeno del pasto Maralfalfa, por medio del programa estadístico INFOSTAT, versión 2011e

Análisis de la varianza

Variable	N	R²	R² Aj	CV
Nddf (%)	20	0.27	0.08	33.27

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	19.97	4	4.99	1.41	0.2795
Tratamiento	19.97	4	4.99	1.41	0.2795
Error	53.24	15	3.55		
Total	73.21	19			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=4.11374

Error: 3.5495 gl: 15

Tratamiento	Medias	n	E.E.
4.00	4.07	4	0.94 A
6.00	5.32	4	0.94 A
3.00	5.85	4	0.94 A
5.00	5.92	4	0.94 A
7.00	7.16	4	0.94 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p<= 0.05)

Variable	N	R²	R² Aj	CV
Ndds (%)	20	0.27	0.08	2.00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	19.97	4	4.99	1.41	0.2798
Tratamiento	19.97	4	4.99	1.41	0.2798
Error	53.30	15	3.55		
Total	73.27	19			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=4.11583

Error: 3.5531 gl: 15

Tratamiento	Medias	n	E.E.
7.00	92.84	4	0.94 A
5.00	94.08	4	0.94 A
3.00	94.15	4	0.94 A
6.00	94.68	4	0.94 A
4.00	95.93	4	0.94 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p<= 0.05)