

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

CALIDAD DE UN SUELO MOLLISOL CULTIVADO CON CAÑA DE AZÚCAR
(*Saccharum officinarum*), SOMETIDO A TRES TIPOS DE MANEJO AGRONÓMICO
EN LA FINCA EXPERIMENTAL DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA NACIONAL EN
CAÑAS, GUANACASTE.

Trabajo final de investigación aplicada sometido a la consideración de la Comisión
del Programa de Estudios de Posgrado en Desarrollo Integrado para Regiones Bajo Riego
para optar al grado y título de Maestría Profesional en Desarrollo Integrado de Regiones
Bajo Riego

IVÁN RENÉ CALDERÓN MORA

CARLOS ROBERTO OBANDO CONTRERAS

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica
Sede Regional Guanacaste

2021

Dedicatoria

Gracias al aliento, apoyo y afecto de mi familia he podido llevar a cabo este trabajo, por este motivo, dedico esta obra a mis padres Álvaro Calderón y María Ángela Mora, quienes con sus buenas costumbres y valores me formaron para asumir nuevos retos y enfrentarlos con dedicación y perseverancia.

Ing. Iván René Calderón Mora

Gracias a Dios por darme el don de la vida, dedico esta obra a mi familia, a mi esposa Soledad, a mis hijos; Soledad, Carlos Daniel y Camila, gracias por entender el sacrificio al que fueron sometidos en estos dos años más de estudio, sé que ustedes siempre me han apoyado, también quiero dedicarla a mis padres; Alfredo y Berta por el cariño y apoyo que siempre me brindan.

Ing. Carlos R. Obando Contreras

Agradecimientos

En primer lugar, te agradecemos a ti Dios Todopoderoso por habernos dado la sabiduría y la fortaleza para que fuera posible alcanzar este triunfo y por estar con nosotros en cada momento de nuestras vidas.

A nuestras familias por su cariño, su apoyo, su dedicación y su empeño por ayudarnos a ser mejores personas cada día. Por tanto, esfuerzo para que alcanzáramos este valioso éxito.

Al Dr. Mario Morales por su paciencia, esfuerzo y dedicación durante nuestra carrera profesional, al Ing. Adrián Chavarría y al Ing. Rafael Mata por sus enseñanzas y apoyo a través del desarrollo de este proyecto.

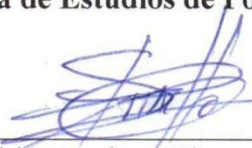
A nuestros compañeros por todo el tiempo compartido a lo largo de la maestría, por su apoyo, comprensión y paciencia para superar este reto, por sus bromas que cada día le daban un matiz cálido a nuestra vida estudiantil.

Gracias a todos que Dios los bendiga.

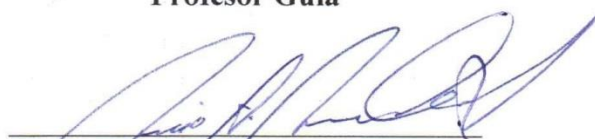
“Este trabajo final de investigación aplicada fue aceptado por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Desarrollo Integrado de Regiones Bajo Riego de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Profesional en Desarrollo Integrado de Regiones Bajo Riego”



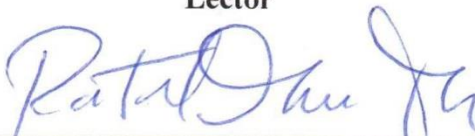
M.Sc. Edwin Solórzano Campos
**Representante de la Decana del
Sistema de Estudios de Posgrado**



M.Sc. Adrián Enrique Chavarría Vidal
Profesor Guía



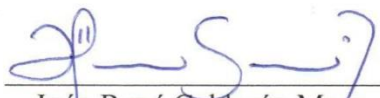
Dr. Mario Alberto Morales Sánchez
Lector



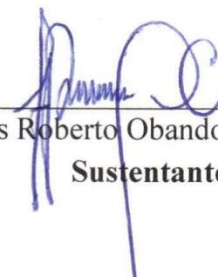
M.Sc. Rafael Ángel Mata Chinchilla
Lector



Dra. Alejandra Rojas González
**Representante del Director del
Programa de Posgrado en Desarrollo
Integrado de Regiones Bajo Riego**



Iván René Calderón Mora
Sustentante



Carlos Roberto Obando Contreras
Sustentante

Índice de Contenidos

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
HOJA DE APROBACIÓN	IV
ÍNDICE DE CONTENIDOS	V
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
ÍNDICE DE CUADROS	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo General.	3
1.2 Objetivos Específicos.	3
2 JUSTIFICACIÓN	3
3 REVISIÓN DE LITERATURA	5
3.1 El Suelo Mollisol.	5
3.2 Calidad de suelo.	6
3.3 Índices de calidad de suelos.	8
3.3.1 Factor A. El perfil del suelo.	9
3.3.2 Factor B. Aspectos texturales de suelos.	9
3.3.3 Factor C. La pendiente del terreno.	9
3.3.4 Factor X. Factores modificadores de la productividad.	9
3.4 Química del suelo.	10
3.5 Biología del suelo.	11
3.5.1 Sustancias húmicas.	12
3.5.2 Nitrógeno y carbón orgánico.	13
3.5.3 Actividad microbiana.	14
3.6 Propiedades físicas de suelos	15
3.6.1 Textura por el método de Bouyoucos	15
3.6.2 Infiltración de agua en el suelo.	16
3.6.2.1 Infiltración por el método del cilindro infiltrómetro.	17

3.6.3	Conductividad hidráulica saturada.	18
3.6.4	Densidad aparente.	18
3.6.5	Porosidad total.	18
3.6.6	Estabilidad de agregados de los suelos	19
3.6.7	Humedad gravimétrica y humedad volumétrica	20
3.6.8	Capacidad de campo (CC)	20
3.6.9	Punto de Marchitez Permanente (PMP)	21
3.7	Parámetros de diseño y caudales requeridos para el riego por surcos.	21
3.7.1	Forma del surco y espaciamiento.	22
3.7.2	Pendiente y orientación de surcos.	22
3.7.3	Caudal a aplicar al surco.	23
3.7.4	Tiempo de aplicación.	23
3.7.5	Longitud del surco	24
3.7.6	Profundidad de raíces.	24
3.7.7	Evapotranspiración.	25
3.7.7.1	Evaporación potencial (Eto)	25
3.7.7.2	Evapotranspiración real (Etr)	25
3.7.7.3	Coefficiente de cultivo (Kc)	25
3.7.8	Lámina neta (Ln).	26
3.7.9	Lámina bruta (Lb).	26
4	METODOLOGÍA	26
4.1	Localización física del área de estudio.	26
4.2	Descripción de los lotes donde se ubica el estudio.	28
4.2.1	Caña sin renovación de cepas (Lote 17).	28
4.2.2	Rotación caña – caña (Lote 10).	28
4.2.3	Rotación caña – arroz – caña (Lote 21).	28
4.2.4	Palmar en regeneración natural (Lote B).	29
4.3	Determinación del Índice de Calidad para los suelos de la Finca Experimental UTN.	29
4.3.1	Determinación del Factor A o perfil del suelo.	30
4.3.2	Determinación del Factor B o aspectos texturales del suelo.	30

4.3.3	Determinación del Factor C o pendiente del suelo.	30
4.3.4	Determinación del Factor X.	30
4.4	Cuantificación de las características biológicas.	31
4.5	Parámetros de diseño y caudales para riego por surcos.	32
5	RESULTADOS Y ANÁLISIS.	32
5.1	Determinación del Índice de Calidad según Storie para los suelos mollisoles cultivados con caña de azúcar y bajo diferentes manejos agronómicos.	32
5.1.1	Determinación del Factor A o perfil de suelo.	32
5.1.2	Determinación del Factor B o aspectos texturales del suelo.	34
5.1.3	Determinación del Factor C o pendiente.	37
5.1.4	Determinación del Factor X.	38
5.1.4.1	Drenaje.	38
5.1.4.2	Erosión.	39
5.1.4.3	Microrrelieve.	39
5.1.4.4	Conductividad eléctrica.	40
5.1.4.5	Capacidad de Intercambio de Cationes Efectiva (CICE).	40
5.1.4.6	Acidez del suelo (pH).	40
5.1.4.7	Contenido de nutrimentos.	41
5.1.5	Índice compuesto de Storie.	44
5.2	Análisis del componente biológico.	45
5.2.1	Carbono orgánico.	45
5.2.2	Respiración Basal.	46
5.2.3	Recuento de grupos microbianos	46
5.3	Parámetros de diseño y caudales para riego por surcos en los lotes con manejo agronómico diferenciado.	48
5.3.1	Cálculo de la lámina bruta (Lb) y de la lámina neta (Ln).	48
5.3.2	Determinación de las pendientes y sentido del riego.	49
5.3.3	Cálculo de la frecuencia de riego (Fr).	50
5.3.4	Longitud de surco (L).	51
5.3.5	Caudal máximo no erosivo (Qmáx).	51
5.3.6	Caudal de infiltración (Qinf).	52
5.3.7	Tiempo de infiltración (Ti), tiempo de avance (Ta) y tiempo total de riego (Tt).	52

5.3.8 Volumen total de riego por surco gastado según estudio y según el caudal aplicado por la finca.	53
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	54
7 BIBLIOGRAFÍA	58
8 ANEXOS	65
8.1 ANEXO 1. Longitud máxima de surcos (m) y caudal máximo a aplicar según pendiente.	65
8.2 ANEXO 2. Carta para la calificación de los suelos	66

Resumen

En el siguiente trabajo de investigación se aplicó la metodología de Storie (1970) para determinar el estado de calidad de cuatro suelos del orden Mollisol ubicados en la Finca Experimental de la Universidad Técnica Nacional, situada en Cañas, Guanacaste, Costa Rica; tres de ellos sembrados con el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) con manejos agronómicos diferenciados, a saber el Lote 17 con cultivo de caña de azúcar permanente, actualmente tiene una cepa con más de 10 años de vida útil, el Lote 10 con manejo de renovación de cepa cada cinco años y el Lote 21 con rotación caña – arroz - caña con ciclos de cinco años para caña y dos años para arroz, el cuarto lote es un área en regeneración natural (Lote B), donde predomina en un 70% la palma real (*Roystonea regia*) y especies de árboles nativos del bosque tropical seco. Se tomó como línea base para un análisis comparativo el trabajo realizado por el Ingeniero Alexis Vásquez, realizado en esta finca en el año 1977. Como parámetros de análisis se midieron aquellos que indica la metodología de Storie agrupados en los factores llamados A, B, C y X. Todas las evaluaciones se realizaron durante los años 2020 y 2021.

Como complemento se analizó el componente biológico de estos suelos, en particular se evaluaron algunos parámetros como respiración basal del suelo, la cantidad de bacterias, hongos y actinomicetos y se identificaron los principales hongos y bacterias hallados.

Los resultados que arrojaron estos análisis indican que estos suelos presentan degradación de algunas variables físicas, en particular la pérdida del horizonte A por erosión, relacionado a sobrerriegos y densificación del mismo por mecanización excesiva. No se encontraron problemas de acidez, ni de salinidad en el componente químico. Las variables biológicas presentaron valores intermedios, aunque en algunos casos se hallaron valores de respiración basal bajos; la cantidad de materia orgánica es un componente que se debe aumentar para mejorar el sistema productivo.

Como tercer objetivo propuesto se determinó el caudal de riego no erosivo y la frecuencia de riego para el cultivo de caña de azúcar en los diferentes manejos agronómicos usados.

Palabras clave: Degradación; fertilidad del suelo, mollisoles

Abstract

In the present research work, Storie's (1970) methodology was applied to determine the status quality of four soils of the Mollisol order located in the Finca Experimental in Universidad Técnica Nacional at Cañas, Guanacaste, Costa Rica; three of them planted with sugar cane (*Saccharum officinarum*) with differentiated agronomic administration. Lot 17 with permanent sugar cane cultivation currently has a vine with more than ten years of useful life; lot 10 is managed with vine renewal every five years, and lot 21 has a five-year sugarcane-rice-cane rotation with five-year cycles for sugarcane and two-year cycles for rice. The fourth lot is an area under natural regeneration (Lot B), where 70% of the trees are royal palm (*Roystonea regia*) and native tree species of the dry tropical forest. The baseline for a comparative analysis was taken from the work performed by engineer Alexis Vásquez carried on this farm in 1977. The analysis parameters measured were those indicated by Storie's methodology, grouped into factors A, B, C, and X. All evaluations were carried out during the years 2020 and 2021.

As a complement, the biological component of these soils was analyzed. In particular, some parameters such as basal soil respiration, the number of bacteria, fungi, and actinomycetes were evaluated, and the primary fungi and bacteria found were identified.

These analyses indicate that these soils display degradation of some physical variables, particularly the loss of the A horizon due to erosion. It is related to over-watering and densification due to excessive mechanization. No acidity or salinity problems were found in the chemical component. The biological variables presented intermediate values, although low basal respiration values were found; the amount of organic matter is a component that should be increased to improve the productive system.

The third proposed objective determined the non-erosive irrigation flow rate and irrigation frequency for the sugarcane crop under the different agronomic approaches used.

Key words: Degradation, soil fertility, mollisols.

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Infiltración básica, según tipo de suelo.	17
Cuadro 2. Valores de Kc para caña de azúcar según FAO.	25
Cuadro 3. Coordenadas de las calicatas estudiadas en coordenadas CRTM05	28
Cuadro 4. Descripción de los horizontes del suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote17), caña-caña (Lote10), caña-arroz-caña (Lote 21) y palmar en regeneración natural (Lote B) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica.	33
Cuadro 5. Variables físicas del suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote10), caña-arroz-caña (Lote 21) y Palmar en regeneración natural (Lote B) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica.	34
Cuadro 6. Calificación según Storie (1970) del Factor B para el suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10), caña-arroz-caña (Lote 21) y palmar en regeneración natural (Lote B) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica.	37
Cuadro 7. Calificación según Storie (1970) del Factor C del suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10), caña-arroz-caña (Lote 21) y palmar en regeneración natural (LOTE B) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica.	37
Cuadro 8. Parámetros de acidez y conductividad eléctrica (CE) del suelo mollisol en los lotes: caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10), caña-arroz-caña (Lote 21) y palmar regeneración natural (Lote B) de la Finca Experimental de la UTN, Sede Guanacaste.	41
Cuadro 9. Variables químicas del suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10), caña-arroz-caña (Lote 21) y palmar en regeneración natural (Lote B) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Guanacaste	43
Cuadro 10. Calificación según Storie del Factor X del suelo mollisol en los lotes: caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10), caña-arroz-caña (Lote 21) y palmar en regeneración natural (Lote B) de la Finca Experimental UTN, sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica.	44
Cuadro 11. Estimación de los índices de Storie con base en los Factores A, B, C y X del suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10), caña-arroz-caña (Lote 21) y Palmar en regeneración natural (Lote B) de la Finca Experimental de la UTN.	45
Cuadro 12. Contenidos de carbono orgánico, nitrógeno total y respiración microbiana del suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10), caña-arroz-caña (Lote 21) y palmar en regeneración natural (Lote B) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica.	46

- Cuadro 13. Recuento de los principales grupos de microorganismos presentes en el suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10), caña-arroz-caña (Lote 21) y palmar en regeneración natural (Lote B) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica 47
- Cuadro 14. Géneros de bacterias y hongos dominantes del suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10), caña-arroz-caña (Lote 21) y palmar en regeneración natural (Lote B) de la Finca Experimental UTN, Cañas, Guanacaste. 48
- Cuadro 15. Lámina neta necesaria para el riego por surcos del suelo mollisol para seis meses secos, en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10) y rotación caña-arroz-caña (Lote 21) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica. 49
- Cuadro 16. Pendientes de surcos del suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10) rotación caña-arroz-caña (Lote 21) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica. 49
- Cuadro 17. Evapotranspiración potencial (Eto), coeficiente de cultivo por etapa (Kc) y evapotranspiración del cultivo (Etc) para los meses comprendidos entre diciembre y mayo en la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica. 50
- Cuadro 18. Frecuencia de riego del suelo mollisol para seis meses secos, en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10), rotación caña-arroz-caña (Lote 21) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica. 50
- Cuadro 19. Longitud de surco establecido y teórico del suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10), rotación caña-arroz-caña (Lote 21) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica. 51
- Cuadro 20. Caudal máximo no erosivo del suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (LOTE 17), caña-caña (LOTE 10), rotación caña-arroz-caña (LOTE 21) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica. 51
- Cuadro 21. Caudal de infiltración del suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10), rotación caña-arroz-caña (Lote 21) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica. 52
- Cuadro 22. Tiempo de infiltración (Ti), tiempo de avance (Ta) y tiempo total de riego (Tt) del suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (LOTE 17), caña-caña (LOTE 10) rotación caña-arroz-caña (LOTE 21) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica. 53
- Cuadro 23. Número de riegos (Nº) y volumen total de agua (Vt) consumida por surco según el estudio realizado y aplicación de la finca en el suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (LOTE 17), caña-caña (LOTE 10) rotación caña-arroz-caña (LOTE 21) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica. 54

Índice de Figuras

Figura 1. Triángulo textural para la determinación de la textura del suelo según USDA	16
Figura 2. Diagrama de colocación de los anillos infiltrómetros	17
Figura 3. Riego por surcos en el cultivo de caña de azúcar	21
Figura 4. Localización de los lotes en estudio y de las calicatas estudiadas.	27



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

SEP Sistema de
Estudios de Posgrado

Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, IVÁN RENÉ CALDERÓN MORA, con cédula de identidad 1 1357 0936, en mi condición de autor del TFG titulado CALIDAD DE UN SUELO MOLLISOL CULTIVADO CON CAÑA DE AZÚCAR (Saccharum officinarum), SOMETIDO A TRES TIPOS DE MANEJO AGRONÓMICO EN LA FINCA EXPERIMENTAL DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA NACIONAL EN CAÑAS, GUANACASTE

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI NO *

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

SEP Sistema de
Estudios de Posgrado

Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, CARLOS ROBERTO OBANDO CONTRERAS, con cédula de identidad 1 0761 0827, en mi condición de autor del TFG titulado CALIDAD DE UN SUELO MOLLISOL CULTIVADO CON CAÑA DE AZÚCAR (Saccharum officinarum), SOMETIDO A TRES TIPOS DE MANEJO AGRONÓMICO EN LA FINCA EXPERIMENTAL DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA NACIONAL EN CAÑAS, GUANACASTE

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI NO *

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

1 Introducción

Los suelos agrícolas de buena calidad se caracterizan por ser lo suficientemente estables como para conservar una buena estructura, que favorezca el suministro de agua y aire, mantener los cultivos en posición vertical, además de proveer una oferta de nutrimentos adecuada, pero también lo suficientemente friables como para permitir la proliferación óptima de raíces, flora y fauna del suelo (Reynolds et al. 2002).

Según Rossiter (1990) y FAO (2000) el uso agrícola de la mayoría de las tierras se efectúa con base a un manejo convencional, que lleva como base las recomendaciones de los servicios de extensión o por extrapolación de resultados experimentales. Sin embargo, en distintos ámbitos la incorporación de tierras para la agricultura es realizada sin estudios previos, que indiquen el o los usos más apropiados y sus efectos sobre el medio ambiente, lo que puede ocasionar pobreza, degradación ambiental, explotación económica ineficiente y pérdida irreparable de recursos naturales como suelo y agua.

La valoración de la calidad de los suelos es una herramienta fundamental para medir variaciones negativas o positivas en los mismos y así determinar posibles procesos de degradación de sus propiedades, por causas de prácticas agrícolas inapropiadas a través del tiempo (Amézquita, 2001).

Hoy en día existen tendencias mundiales que pretenden dar funcionalidad al concepto de calidad de suelo como método para evaluar la función de productividad y sostenibilidad del recurso suelo. De acuerdo a Ferreras et al (2009) estimar la calidad de los suelos es importante, puesto que contribuye a alcanzar la sostenibilidad en los diferentes sistemas de manejo.

Para tomar decisiones oportunas frente a posibles deterioros de la calidad de los suelos, se requiere implementar un sistema de evaluación integral que permita mediante sus resultados detectar los problemas existentes, para llevar a cabo acciones correctivas y desarrollar un manejo más sostenible (Kettler et al 2000).

En la actualidad se han fomentado los estudios de los indicadores bioquímicos y biológicos en el suelo, puesto que describen los principales procesos metabólicos que ocurren en él; por esta razón estas variables del suelo pueden tener un rol fundamental como indicadores tempranos y sensibles de degradación o restauración como consecuencia de diferentes prácticas de manejo (Ferrerías et al 2009).

A nivel mundial se realizan esfuerzos para tratar de identificar cambios en las propiedades de los suelos; este interés nace por la fuerte explotación que éstos han tenido en las últimas décadas y se requiere conocer el estado actual de la calidad física, química y biológica de esos suelos. Estos esfuerzos deberían intensificarse y aún más en aquellos suelos donde la explotación agrícola es intensa como es el caso de la caña de azúcar.

Las producciones de caña de azúcar a nivel mundial se han mantenido económicamente rentables por más de 50 años, pero es conocido el efecto que tienen los sistemas de producción de monocultivo sobre la calidad de los suelos (Peralta, 2012). Estudios realizados con experimentos de larga duración en la red experimental del Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA), Colombia, demostraron que el monocultivo de la caña de azúcar contribuye a la degradación paulatina del suelo, a través de una disminución en el contenido de materia orgánica, que se acentúa progresivamente cuando se elimina la lámina de residuos de cosecha dejada en el campo por la quema u otras prácticas culturales (Pablos *et al*, 2007).

El cultivo de la caña de azúcar en Costa Rica constituye una de las actividades agrícolas denominadas significativas dentro del sector agropecuario, por la importancia que tiene en el Producto Interno Bruto, así como sobre el empleo directo e indirecto que produce (Araya, 2001).

En los últimos 10 años en la Finca Experimental de la Universidad Técnica Nacional (UTN) en Cañas, Guanacaste, se han implementado prácticas diferenciadas de manejo agronómico del cultivo de la caña de azúcar, como alternativas para evitar los procesos de degradación de los suelos. Dentro de esas prácticas de manejo está la rotación de caña de azúcar con arroz (*Oryza sativa*); esta rotación se ha implementado con la finalidad de recuperar paulatinamente los suelos y romper ciclos de malezas para favorecer la

producción de ambos cultivos. También se han implementado prácticas de regeneración de cepas en ciclos de 5 años con la correspondiente labranza de suelo y, por el contrario, sistemas de manejo de cepas con renovación a largo plazo, con la finalidad de evitar la labranza intensiva. Tomando como referencia lo anterior se plantea la siguiente interrogante ¿Será que los diferentes manejos agronómicos de la caña de azúcar implementados en la Finca Experimental de la Universidad Técnica Nacional en suelos mollisoles sembrados con caña de azúcar tendrán un impacto positivo como estrategia para mantener la calidad y evitar la degradación de los mismos?

1.1 Objetivo General.

Evaluar el efecto de tres diferentes manejos agronómicos del cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) sobre la calidad de suelos del orden Mollisol bajo riego, en la Finca Experimental de la Universidad Técnica Nacional, ubicada en Cañas, Guanacaste, Costa Rica.

1.2 Objetivos Específicos.

- Determinar según la metodología de Storie (1970) los índices de calidad para suelos del orden Mollisol cultivados con caña de azúcar que han sido sometidos a tres distintos manejos agronómicos, a saber, rotación caña-arroz-caña, rotación caña-caña y caña sin renovación de cepa.
- Medir los principales parámetros de la actividad biológica de suelos del orden Mollisol cultivados con caña de azúcar y sometidos a tres diferentes manejos agronómicos.
- Establecer los parámetros de diseño y caudales requeridos para el riego por surcos en suelos del orden Mollisol cultivados con caña de azúcar, para optimizar el uso del recurso hídrico y evitar la erosión por sobrerriego.

2 Justificación

El uso de la tierra para la producción agropecuaria está relacionado con la utilización óptima y apropiada de los recursos naturales, entre los cuales el suelo representa uno de los factores considerados determinantes para el éxito de la producción agrícola (Chaves 2017).

Según Piscitelli (2015) el suelo agrícola es el medio para que las plantas puedan crecer y desarrollarse y que justamente debido a este rol, se presentan en ellos, cambios, transformaciones e intercambios, tanto de materiales minerales y biológicos como de energía; esto nos da a entender que el suelo es dinámico y que, por lo tanto, puede cambiar su estado inicial a nuevos y diferentes estados.

Cortés (2013) indica que la degradación física, química y biológica del suelo por su uso agrícola, continúa siendo un proceso frecuente. Esta degradación se debe principalmente a la erosión hídrica y eólica y a la pérdida de propiedades importantes para su productividad, debido a la carencia de buenas prácticas agrícolas.

Este mismo autor (Cortés 2013) considera que la degradación del suelo no es otra cosa que la reducción de la capacidad del mismo para sostener la productividad a través del tiempo. La sostenibilidad no implica necesariamente una estabilidad continua de los niveles de productividad, sino más bien la resiliencia de la tierra; en otras palabras, su capacidad para recuperar rápidamente los niveles anteriores de producción o para retomar la tendencia de una productividad en aumento después de un período adverso a causa de las sequías, inundaciones y mal manejo humano, entre otros factores. Así la calidad del suelo no sólo involucra el estado de los atributos de productividad, sino su estabilidad y resiliencia en el tiempo.

Actualmente existe diferentes métodos para evaluar la calidad de los suelos; éstos se han desarrollado de acuerdo a indicadores cuantitativos y cualitativos, así como variables medibles tanto a nivel de campo como en laboratorio, que permiten medir el proceso de degradación en los suelos y así determinar la capacidad productiva. Estos índices están basados principalmente en la integración de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y de sus relaciones con otras variables como el relieve y las condiciones climáticas predominantes en una región determinada.

Las fincas productoras de caña de azúcar en Costa Rica, sean éstas medianas o pequeñas, han desarrollado su manejo productivo tomando como base los manejos agronómicos implementados por las grandes empresas azucareras, esto es políticas empresariales de producción que les han permitido maximizar rendimientos y ganancias sin

considerar con frecuencia la calidad de los suelos, lo que ha provocado degradación física debido entre otros factores a la utilización de maquinaria agrícola de gran magnitud al realizar las diferentes prácticas de manejo. Esta degradación física conlleva eventualmente a procesos de erosión eólica e hídrica, que con el pasar del tiempo provocará en los suelos una degradación de los atributos de productividad químicos y biológicos.

Debido a lo anterior, en los últimos años este sector productivo ha iniciado una serie de políticas y prácticas conservacionistas, que permitan disminuir el grado de deterioro de los suelos. Actualmente existe mucho interés de parte de las grandes empresas de disminuir estos impactos negativos, donde la meta es desarrollar con el tiempo un uso sostenible de los recursos naturales.

La evaluación de la calidad de los suelos debe ser una actividad continua e indispensable para dar seguimiento a variables negativas o positivas del sistema de producción y disminuir así la incidencia de procesos degradativos (Peralta, 2012).

Según Peralta (2012) tomar decisiones oportunas frente a posibles deterioros de la calidad de los suelos, requiere hacer el seguimiento de sus características físicas, químicas y biológicas a través del tiempo, para lo cual es necesario implementar un sistema de evaluación integral, que permita mediante sus resultados detectar problemas para llevar a cabo acciones correctivas dirigidas hacia la conservación del recurso suelo.

3 Revisión de Literatura

3.1 El Suelo Mollisol.

FAO (2020) define el suelo como el medio natural para el crecimiento de las plantas. Este es un cuerpo natural que consiste en capas u horizontes compuestos de materiales de minerales meteorizados, materia orgánica, aire y agua. El suelo es el producto final de la influencia del tiempo, del clima, topografía, organismos (flora, fauna y ser humano) sobre los materiales parentales (rocas y minerales originarios). Como resultado el suelo provee para el crecimiento vegetal cinco factores de crecimiento, a saber, sustrato físico, agua, aire, calor y elementos minerales esenciales.

La taxonomía de suelos define el orden de suelos Mollisol como suelos minerales típicos de las praderas, que tienen un horizonte superficial muy oscuro, alto en materia orgánica, rico en bases y fósforo. Todos estos suelos tienen un epipedón móllico y muchos poseen un horizonte de diagnóstico subsuperficial argílico, nátrico o cálcico, algunos pocos pueden presentar un horizonte de diagnóstico álbico, petrocálcico o duripan. La vegetación típica de los mollisoles es de pradera y se desarrollan en una gran variedad de climas, cuyos regímenes de humedad van desde el acuic al xeric, mientras que los regímenes de temperatura del suelo van desde el cryoico al hipertérmico. Normalmente la precipitación de las zonas donde hay mollisoles oscila entre los 200 y los 800 mm anuales (Ibáñez, 2011, INTA 2015).

Según Ibáñez (2011) los factores de formación de un suelo Mollisol no son esencialmente “estrictos”, ya que estos son suelos que se desarrollan en una gran variedad de zonas climáticas, pero la alternancia de periodos de humedecimiento y secado favorece su formación. En cuanto a la vegetación este autor (Ibáñez, 2011) indica que estos son suelos de pradera de herbáceas perennes, que anualmente tienen un importante aporte de materia orgánica. En lo que respecta al material parental, este no es un factor limitante, pues pueden formarse mollisoles por alteración de materiales muy diversos, aunque requieren altos contenidos de bases. Los mollisoles son de los suelos agrícolas más importantes y productivos del mundo y son ampliamente usados para este propósito.

Los mollisoles de Costa Rica ocupan una extensión relativamente pequeña (1,4% del territorio cartografiado del país) y en su mayoría dentro del régimen de humedad ústico en el Pacífico Norte, por lo que clasifican como Ustolls, algunos con características vérticas y otros en regímenes más húmedos que clasifican como Udolls (Bertsch et al. 2000). Según el INTA (2015) en Costa Rica el material parental de los mollisoles es generalmente calcita, un mineral más estable que el carbonato de calcio.

3.2 Calidad de suelo.

El USDA (1999) define calidad del suelo como la “capacidad de funcionamiento de un tipo específico de suelo”. Johnson *et al* (1997) indican que la calidad del suelo es “una medida de las condiciones del mismo relativas al requerimiento de una o más especies

vegetales y/o a la necesidad humana”. Por otro lado, Lal (1998) define la calidad del suelo como “un conjunto de capacidades del mismo para realizar funciones específicas” y en términos de agricultura lo define como “su capacidad para lograr producciones sostenibles”, mencionando además que existe un fuerte vínculo entre la calidad de los suelos y la agricultura sostenible. Otros autores como Doran y Parkin (1996) dan definiciones más amplias sobre la calidad de los suelos y la establecen como “la capacidad del suelo para funcionar dentro de un ecosistema de uso agrícola con una sostenibilidad biológicamente productiva, conservando sus atributos ambientales y capacidad de generar salud tanto en plantas como animales”. Acton y Gregorich (1995) entienden calidad de suelo como “la condición del suelo para mantener el crecimiento de las plantas sin causar degradación del mismo o daño ambiental”.

El concepto de calidad de suelo trasciende a la definición de fertilidad, la cual se limita a la oferta y disponibilidad de nutrimentos para las plantas, pero no abarca todas las propiedades del suelo que influyen sobre la producción vegetal (Parr et al. 1992; Karlen et al. 1992).

Definir lo que es la calidad de un suelo o tratar de enmarcar este concepto dentro de un esquema de lo que es un suelo bueno o un suelo malo, no es fácil de precisar; en muchas ocasiones la calidad de los suelos está parametrizado por el tipo de actividad agrícola que se efectúa en la región. Así la calidad del suelo puede tener diferentes definiciones dependiendo de la perspectiva sobre la cual se analiza, sin embargo, esta perfilada como un compuesto de condiciones específicas que le permiten al suelo funcionar para un uso determinado con alta resiliencia en el tiempo (Maurice *et al*, 1998).

Según Nogales (2010) y Ferreras et al (2009) en la actualidad gran parte de los suelos del mundo pierden calidad y se encuentran sometidos a procesos de degradación. El deterioro del suelo constituye uno de los problemas medioambientales más importantes a escala mundial y es junto con el cambio climático la principal amenaza para la conservación de la biodiversidad, la conservación de los recursos naturales y la sostenibilidad de las cosechas.

3.3 Índices de calidad de suelos.

Un indicador es una variable que facilita información relevante haciendo que una condición de interés se haga perceptible y que se pueda cuantificar, se pueda medir y se pueda comunicar en forma comprensible. Los indicadores deben ser preferiblemente variables cuantitativas, aunque pueden también algunas veces ser cualitativas nominales, de rango u ordinales, especialmente cuando no hay disponibilidad de información cuantitativa o cuando los costos para cuantificar son demasiado elevados (Volveré y Amézquita 2009).

Adriaanse (1993) se refiere a los indicadores como instrumentos de análisis que nos permiten simplificar, cuantificar y comunicar fenómenos complejos y son muy utilizados en muchos campos del conocimiento como en economía, salud y en especial en el estudio de los recursos naturales.

Los indicadores deben ser limitados en número, manejables por diversos tipos de usuarios, sencillos, fáciles de medir y tener un alto grado de agregación, es decir deben ser propiedades que resuman otras cualidades o propiedades, ser interdisciplinarios y en lo posible estos deberán contemplar la mayor diversidad de situaciones; por lo tanto, deben incluir todo tipo de propiedades (químicas, físicas, biológicas u otras), tener una línea de base o variación en el tiempo, tal que sea posible realizar un seguimiento de las mismas. Asimismo, no deberán poseer una sensibilidad alta a los cambios climáticos y ambientales, pero que sean sensibles como para detectar los cambios producidos por el uso y manejo de los recursos (Gallopín 1997, Doran y Parkin 1996, Doran y Zeiss 2000, Volveré y Amézquita 2009).

Storie (1970) menciona que el índice de calidad de un suelo se refiere a una expresión matemática del grado en el que un suelo presenta condiciones favorables para el desarrollo de la planta y lograr una cosecha en buenas condiciones ambientales. Para establecer esta calificación Storie (1970) indica que deben de considerarse cuatro factores generales: el perfil del suelo, los aspectos texturales, la pendiente del terreno, y un grupo de propiedades físico químicas, que inciden sobre la productividad y que llamó factor X.

3.3.1 Factor A. El perfil del suelo.

Evalúa todas las características del perfil del suelo, excepto la textura de los horizontes superficiales. Estas propiedades son determinadas por la clase de la roca madre, modo de formación o acumulación y la edad o grado de modificación del material del suelo por los agentes climáticos, complementados por la vegetación y alternadas por la erosión y el depósito y sirve para separar a los suelos en grupos de individuos afines que se clasifican como series de suelos.

3.3.2 Factor B. Aspectos texturales de suelos.

Este factor comprende características de los suelos superficiales, independientemente del subsuelo. Define la textura del suelo y otras calidades que dependen de la textura como la consistencia de los agregados, la porosidad de la masa del suelo, su permeabilidad al agua, comportamiento de actividades de labranza y otras propiedades similares.

3.3.3 Factor C. La pendiente del terreno.

La pendiente de la superficie de un terreno es de importancia para el uso de ésta en los cultivos. Los suelos con mucha pendiente son difíciles de labrar y los suelos de montaña son aún de menor valor.

Suelos casi a nivel o con pendiente ligera, son aptos para el desarrollo de cultivo y de labranza. Conforme aumenta la pendiente disminuye el uso agrícola que se le puede dar a un suelo.

3.3.4 Factor X. Factores modificadores de la productividad.

En este factor se agrupan condiciones distintas al perfil, textura de suelo y pendiente. Este comprende el drenaje, contenido de álcali o sal, contenido general de nutrimentos, acidez, erosión y microrrelieve, condiciones que el ser humano puede modificar por el tratamiento de los suelos y que se denominan factores cambiables.

Según Storie (1970) cada uno de estos factores se evalúa con base a 100% para las condiciones más favorables o ideales y se asigna una disminución porcentual cuando las condiciones son menos favorables para el desarrollo de las plantas.

Respecto al índice de Storie FAO (2003) indica que este tenor expresa la influencia conjunta de los factores de suelo sobre la productividad de cultivos, en el cual se asigna a cada factor principal un porcentaje del valor ideal para luego multiplicarlos y asignar un valor único. Cabe señalar que cada factor principal está compuesto por diversos parámetros.

Según Riquier et. al. (1974) los métodos paramétricos desarrollados para medir variables de calidad de suelos, como los índices de Storie, presentan las siguientes características:

- Evaluación independiente: a cada una de las variables o características consideradas se les asigna un valor numérico en función de su influencia sobre la capacidad productiva de los suelos (parámetros).
- Combinación: los diferentes valores numéricos obtenidos (parámetros) según diversas operaciones matemáticas, generan una puntuación final en una escala que por regla general es de 0 a 100 (índices).

Desde 1930 se han desarrollado diversas propuestas de carácter paramétrico que, paulatinamente, han incorporado un mayor número de factores para cuantificar la capacidad productiva de un medio edáfico. Mientras unos sistemas son muy poco conocidos, restringidos al ámbito local o regional, otros son aceptados internacionalmente como el Índice de Storie y el sistema de Riquier, Bramao y Cornet (Vidal y Díaz, 2002).

3.4 Química del suelo.

Según Bautista *et al.* (2004) la química del suelo juega un papel muy importante en la nutrición vegetal y fisiología microbiana; desde la perspectiva agronómica la mayor expresión es la fertilidad del suelo, una propiedad resultante de la interacción entre las características físicas, químicas y biológicas de suelo, que brinda la capacidad de suministrar los nutrientes minerales esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Ramírez (1997) menciona que dentro de todos los procesos que se dan en la química del suelo, el más importante es el intercambio iónico, este junto con la fotosíntesis son los dos procesos de mayor importancia para el crecimiento de las plantas. El intercambio iónico es

debido casi en su totalidad a la fracción de arcilla y a la materia orgánica. La capacidad de intercambio catiónico se define como el número de cargas negativas presentes en la fracción fina del suelo y se expresa en centimoles (+) por litro de suelo (cmol (+)/L) (Ramírez, 1997).

Según Peralta (2009) se distinguen como degradación química los siguientes procesos:

- Pérdida de nutrientes: se presenta en sitios donde no se restituyen los nutrientes extraídos.
- Pérdida de materia orgánica: se presenta cuando hay excesiva limpieza de material vegetal en las plantaciones o quemas, sin adición de otras fuentes de materia orgánica.
- Salinización: se presenta por malos manejos del riego o el uso de aguas con altos contenidos de sales. En sitios donde la evaporación es mayor que la precipitación el proceso se acelera.
- Acidificación: se presenta por el mal uso de fertilizantes, procesos naturales y/o antrópicos que favorecen el lavado de bases.
- Contaminación: se presenta por el excesivo uso de plaguicidas, abonos, o plumas de hidrocarburos contaminantes.

Los indicadores químicos más usados para generar índices de calidad de suelos son: la capacidad amortiguadora de la acidez del suelo, la disponibilidad de nutrientes para las plantas y microorganismos, la conductividad eléctrica, el carbono orgánico total y lábil, la capacidad de intercambio catiónico, el nitrógeno total y mineralizado y la capacidad de adsorción de fosfatos (Estrada, 2017, Cruz et al 2004).

3.5 Biología del suelo.

La biología del suelo es la disciplina que se ocupa del estudio de los organismos que de una u otra forma actúan sobre el suelo, modificando su composición, su estructura y su funcionamiento (Ramírez, 1997).

La actividad biológica del suelo depende de la cantidad y diversidad de especies de microorganismos y de su actividad enzimática. Estos microorganismos intervienen en el 80- 90 % de todos los procesos que ocurren en el suelo y crean condiciones favorables para

la germinación de semillas y el crecimiento del sistema radicular de las plantas (Furtak & Gajda, 2018).

El suelo es uno de los ecosistemas más complejos de la naturaleza y uno de los hábitats más diversos de la tierra; alberga una infinidad de organismos diferentes que interactúan entre sí y contribuyen en los ciclos geoquímicos que hacen posible la vida (FAO 2015).

Los microorganismos del suelo son los seres vivos más sensibles a los cambios ambientales, así, son los primeros que mueren, mutan o cambian sus proporciones ante las malas praxis de manejo agrícola (Abecasis, 2015).

Los microorganismos del suelo comprenden virus, bacterias, hongos, algas y protozoos.

Según Abecasis (2015) los microorganismos trabajan mancomunadamente dentro de consorcios y estos consorcios a su vez forman parte de comunidades microbianas. Por ejemplo, para que el *Azotobacter* (uno de los fijadores de nitrógeno más conocido) fije nitrógeno necesita que haya determinados géneros de amebas, además de la concentración adecuada de oxígeno gaseoso y otras condiciones microambientales vitales.

Los sistemas agrícolas y las prácticas agroecológicas que prestan atención a nutrir la biodiversidad del suelo, como la agricultura orgánica, la cero labranza, la incorporación de materia orgánica en sus diferentes modalidades, la rotación de cultivos y la agricultura de conservación pueden aumentar de manera sostenible la productividad (FAO, 2015).

3.5.1 Sustancias húmicas.

Según Abecasis (2015) estas son moléculas complejas que la biota del suelo produce durante largos períodos de elaboración, bajo ciertas condiciones óptimas de temperatura y humedad.

Esas moléculas cumplen funciones indispensables y exclusivas para el normal desarrollo de la vida del suelo, y por ende de las plantas, además de ser reservas de energía para los microorganismos. Entre las principales funciones están: la retención de agua y nutrimentos, la agregación del suelo, la disolución de sales para evitar la salinización, el

incremento de la capacidad de intercambio catiónico y el aglutinamiento de las arenas, entre otras (Abecasis, 2015).

La agricultura moderna rara vez genera las condiciones ideales para que las sustancias húmicas se llegaran a formar suficientemente bien y terminan siendo consumidas por la biota como fuente de energía, con las consecuencias negativas para la diversidad microbiana y la estabilidad mecánica del suelo. Cuando el bioma está en equilibrio las sustancias húmicas no se consumen, ya que son sustancias de reserva de energía que genera la biota para los momentos críticos.

3.5.2 Nitrógeno y carbón orgánico.

Las fuentes de nitrógeno son varias en los suelos y son dos las formas en las que se encuentra, la orgánica que representa más del 95 % del nitrógeno total en el suelo y la inorgánica, principalmente como amonio y como nitrato, que son las formas en que lo toman las plantas (Abecasis, 2015).

El aprovechamiento del nitrógeno atmosférico sólo se logra a partir de la fijación y de la posterior mineralización de la biota fijadora. Casi el 80% del aire es nitrógeno y es de donde ciertas especies de microorganismos lo fijan para luego entregarlo a las plantas de manera simbiótica o asimbiótica. El resto del nitrógeno mineral disponible requiere de la materia orgánica inerte y de procesos aerobios de amonificación y nitrificación (Abecasis, 2015).

Según Steinbach y Álvarez (2005) la materia orgánica del suelo (MOS) es considerada un indicador de la salud del mismo y su efecto positivo sobre la sostenibilidad del sistema productivo ha sido ampliamente documentado.

Los contenidos de materia orgánica en los ecosistemas naturales son más elevados y cuando estos sistemas son cultivados, se produce una rápida caída de la MOS seguida por una declinación más lenta hasta un nuevo estado estable. El contenido de MOS en dicho estado va a depender del clima, del suelo y del manejo agronómico que se le dé al mismo. La intensificación de las actividades agrícolas puede provocar una disminución mayor en los contenidos de materia orgánica, lo que, en algunos casos, dependiendo del tipo de suelo

y de la textura va a presentar sólo el 50% de su contenido original. (Steinbach y Álvarez, 2005).

Según Nogales (2010) la materia orgánica es fundamental en la fertilidad y productividad de los suelos, ya que es imprescindible en el desarrollo y funcionalidad de un ecosistema terrestre. La materia orgánica influye de una forma directa sobre las propiedades físico-químicas y biológicas, de modo que cualquier disminución de ella implicaría la posible degradación del suelo. Por ello, la aplicación de residuos orgánicos estabilizados mediante procesos, entre otros, de compostaje y vermicompostaje, constituye una herramienta eficaz para minimizar los procesos de degradación del suelo, a la vez que posibilita la reutilización de estos materiales, cuya acumulación constituye con frecuencia un grave problema medioambiental.

Si bien los indicadores físicos, químicos y biológicos no determinan la calidad del suelo de manera independiente, la mayoría de los estudios coinciden en que la MOS es el principal indicador biológico e indudablemente el que posee una influencia más significativa sobre la calidad del suelo y su productividad (Duval et al., 2013; Dexter et al., 2008).

3.5.3 *Actividad microbiana.*

En la mayoría de los suelos los microorganismos dinamizan el componente biológico y responden rápidamente a los cambios del ambiente. Estos son esenciales para realizar las múltiples funciones del suelo, participan en casi todas las reacciones metabólicas conocidas y constituyen las fuerzas motrices del suministro de energía y nutrientes (Paolini, 2017).

Entre las técnicas más usadas para medir la actividad microbiana está la medición del consumo de O₂ o el desprendimiento de CO₂ y su determinación en condiciones controladas de laboratorio, esta técnica se conoce con el nombre de actividad microbiana o respiración basal y es el mejor indicador de la actividad metabólica global de las comunidades microbianas del suelo (Nannipieri et al., 1990; Pell et al., 2006).

Los suelos anegados tienen por lo general una menor tasa de respiración debido a que el agua ocupa los espacios porosos y el oxígeno atmosférico no puede penetrar rápidamente. (Linn y Doran, 1984b); otros factores que disminuyen la tasa de respiración basal son la compactación y los bajos contenidos de MOS (Paolini, 2017).

3.6 Propiedades físicas de suelos

Las propiedades físicas del suelo son un componente esencial en la evaluación de la calidad de los mismos, porque no se pueden mejorar fácilmente (Singer y Ewing, 2000). Según Ramírez (1997) las características físicas son en gran parte responsables del adecuado desarrollo de las plantas, pero muy pocas veces se les toma en cuenta.

Las propiedades físicas que pueden ser utilizadas como indicadores de la calidad del suelo son aquellas que reflejan la manera en que este recurso acepta, retiene y transmite agua a las plantas, así como las limitaciones que se pueden encontrar en el crecimiento de las raíces, la emergencia de las plántulas, la infiltración y el movimiento del agua dentro del perfil y que además están relacionadas con el arreglo de las partículas y los poros. Entre otros están la textura, estructura, densidad aparente, estabilidad de agregados, infiltración, conductividad hidráulica, profundidad del suelo y presencia de capas endurecidas.

3.6.1 Textura por el método de Bouyoucos

El método de Bouyoucos permite conocer el contenido porcentual relativo de arena, limo y arcilla del suelo. Este consiste en realizar una dispersión química por medio de sales de sodio y una licuación que permite que las partículas primarias se comporten individualmente en una suspensión acuosa y que sedimentan a velocidades diferentes por las variaciones de sus radios, formas, pesos y densidades (Calderón, 2012).

El triángulo textural es un triángulo equilátero, cuyos lados corresponden a los porcentajes de limo, arcilla y arena. El interior del triángulo está dividido en compartimientos, donde cada uno de ellos representa una clase textural (Calderón, 2012).

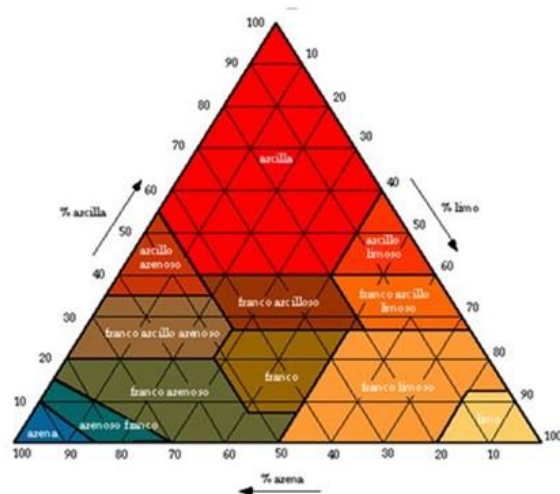


Figura 1. Triángulo textural para la determinación de la textura del suelo según USDA
Tomado de Romero (1989)

3.6.2 *Infiltración de agua en el suelo.*

La infiltración es el proceso por el cual el agua en la superficie del suelo entra al interior del mismo. La tasa de infiltración, en la ciencia del suelo, es una medida de la razón a la cual el suelo es capaz de absorber la precipitación o la irrigación. Se mide en centímetros por hora o metros por hora (Úbeda y Delgado, 2018).

Los valores de infiltración que se obtienen en campo presentan gran variabilidad en la distribución espacial, debido a los siguientes factores:

- Características físicas del perfil del suelo.
- Contenidos de humedad que tenga el suelo.
- Temperatura del suelo.
- Aire atrapado en el suelo.

La infiltración básica se alcanza cuando la velocidad de infiltración se hace aproximadamente constante, o sea, cuando el decrecimiento de ésta es menor al 10% en una hora.

Para Brower et al (1989) los valores de infiltración básica según tipo de suelo son los que se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 1. Infiltración básica, según tipo de suelo.

Tipo de suelo	Infiltración básica (mm/h)
Arenoso	Más de 30
Franco arenoso	20 - 30
Franco arenoso	10 - 20
Franco arcilloso	5 - 10
Arcilloso	1 - 5

Tomado de Villalobos (2008),

3.6.2.1 Infiltración por el método del cilindro infiltrómetro.

Los anillos de infiltración sirven para hacer pruebas que determinan la permeabilidad del suelo, simulando el proceso de infiltración del agua. Las pruebas se realizan enterrando dos anillos de forma concéntrica, esto quiere decir que uno es de diámetro mayor que el otro. Los de mayor tamaño generalmente son de 60 cm de diámetro y los menores de 30 cm de diámetro. Se llenan ambos con agua y se mide la tasa de descenso de esta agua en el anillo interior. Se realiza así para que el flujo del agua en el suelo sea lo más vertical posible, dado que la infiltración en el anillo externo limita el flujo lateral del agua infiltrada por el anillo interno, disminuyendo la distorsión de los datos obtenidos (Delgadillo y Pérez, 2016).

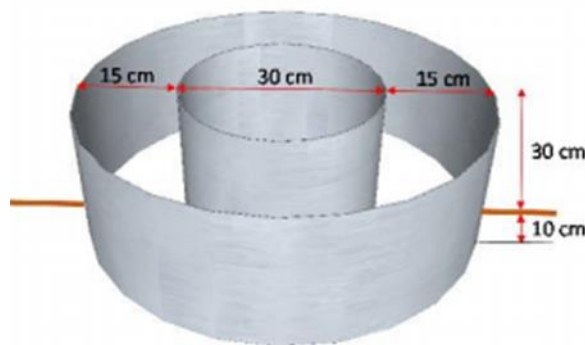


Figura 2. Diagrama de colocación de los anillos infiltrómetros

3.6.3 Conductividad hidráulica saturada.

La conductividad hidráulica es la capacidad del suelo saturado de permitir el paso de agua a través de él. Esta varía tanto en un perfil de suelo como en diferentes clases y tipos de suelos debido a la materia orgánica, la estructura del suelo, la actividad macro y microbiológica, el manejo del suelo, entre otros factores. Se representa con la letra K y sus unidades son longitud por unidad de tiempo (cm/h o m/día).

La determinación de la conductividad hidráulica es un aspecto muy importante para trabajos de ingeniería de suelos, tales como sistemas de drenaje, almacenamientos de agua y programas de conservación de suelos y aguas (Calderón, 2012).

3.6.4 Densidad aparente.

La densidad aparente del suelo (D_a) se define como la masa de suelo seco en una determinada unidad de volumen edáfico (sólidos + poros) (Blake y Hartge, 1986) y su valor se relaciona con la proporción de poros existente en dicho volumen de suelo.

Las alteraciones de la D_a a través del tiempo pueden ser debidas al laboreo, al tránsito de implementos, al pisoteo animal, al crecimiento de las raíces y/o al movimiento de la fauna en su interior. Aumentos en la D_a se asocian a ambientes edáficos más pobres para el crecimiento de las raíces, debido a la reducción de la aireación y al aumento de la resistencia a la penetración y a la generación de cambios no deseados en las funciones hidrológicas, tales como la infiltración y la conductividad hidráulica (Hamza & Anderson, 2005).

Asimismo, el valor de D_a debe ser conocido para poder transformar las concentraciones de nutrientes, minerales y/o carbono en el suelo para el análisis de sus balances, y el cálculo de contenido de agua en volumen (Taalab et al, 2013).

3.6.5 Porosidad total.

La porosidad es la relación existente entre el volumen no ocupado por las partículas sólidas del suelo y el volumen total del suelo. La porosidad influye en la capacidad de

retención de agua, en el movimiento del agua y aire en el suelo, afecta el crecimiento radical, la infiltración y la conductividad hidráulica.

La porosidad depende de la textura, de la estructura, materia orgánica y actividad biológica del suelo principalmente (Romero, 1989).

3.6.6 Estabilidad de agregados de los suelos

La agregación del suelo es el proceso mediante el cual sus partículas primarias, arena, limo y arcilla se unen formando unidades secundarias, llamadas agregados; este proceso se presenta debido a la acción de fuerzas naturales y a sustancias derivadas de exudados de las raíces y provenientes también de la actividad microbiana (Soil Science Society of America, 1997).

La estabilidad de la estructura es una estimación de la capacidad del suelo para mantener la arquitectura de la fracción sólida y del espacio poroso cuando se someten a la acción de fuerzas originadas por la acción del agua o de esfuerzos mecánicos externos (Kay, 1998). El incremento de la agregación debido a la actividad microbiana ha sido descrito en la literatura (Dorioz y Robert, 1987; Dorioz, Robert y Chenu, 1993); este es explicado por los mecanismos de propagación y adhesión de microorganismos (Anderson, 1991). Por una parte, en este proceso participan las bacterias a través de la adhesión a las partículas finas, que conllevan la formación de microagregados (Tiessen y Stewart, 1988), por otra parte, los hongos contribuyen mayoritariamente en la formación de macroagregados (Dorioz y Robert, 1987). Estos sujetan a través de sus hifas las partículas gruesas del suelo (Tippkotter, 1989).

La estructura del suelo es una de las características más importantes dentro del recurso suelo, ya que influye en el movimiento y retención del agua, el drenaje, la aireación, la penetración de las raíces, el ciclo de nutrimentos, y en consecuencia sobre el rendimiento de los cultivos (An S, et al., 2010., Zadorova T, et al. 2011). El suelo durante su formación adquiere diferentes tipos de estructura en dependencia de múltiples factores como el contenido y tipo de arcilla y la cantidad de materia orgánica (Hernández, et al. 2010 Hernández A, et al 2013).

Morales (1996) cita que el mejoramiento de la agregación y el incremento en la firmeza de los agregados tiene un importante significado para la estabilidad mecánica del suelo en conjunto, pues la resistencia mecánica debido a la fricción entre los sólidos del suelo y partículas tanto primarias como secundarias aumenta, como resultado de un ordenamiento menos entrópico de las mismas y un incremento en número y magnitud de los enlaces intra e interagregados.

Asimismo los agregados de un suelo tiene una dependencia de la fuerza con que las arcillas y otros componentes inorgánicos del suelo son sorbidos a la materia orgánica particulada, residuos microbianos, coloides orgánicos y compuestos de origen microbiano, esto hace que el porcentaje de agregados y su distribución por tamaños son los parámetros más importantes que controlan la estabilidad de la estructura y su grado de resistencia a los factores externos (Jastrow, Miller 1998, Desir, G. y Sirven, J. 2001). Por otro lado, Chenu et al. (2000), Sasal et al. (2006), Cosentino et al. (2006) establecen que la estabilidad de agregados se encuentra relacionada con la actividad de los coloides, el contenido orgánico y la actividad microbiana

3.6.7 Humedad gravimétrica y humedad volumétrica

La humedad en suelo se refiere al contenido de agua con relación al peso o volumen de la masa de suelo. Se puede expresar en forma gravimétrica o volumétrica. Gravimétricamente en relación a la masa del suelo y volumétricamente en relación al volumen del suelo (Romero, 1989).

La humedad gravimétrica es la forma más común de expresar la humedad del suelo y se define como la relación entre la masa de agua y la masa de los sólidos del suelo.

La humedad volumétrica se define como la relación entre el volumen del agua contenida en el suelo y el volumen total de este.

3.6.8 Capacidad de campo (CC)

Es el punto donde el suelo ha escurrido los excesos de agua por el simple efecto de la gravedad. Es el punto ideal de disponibilidad de la humedad para la planta, ya que el suelo no se encuentra saturado ni se debe hacer un esfuerzo extra para obtener el agua. El tiempo

de escurrimiento va a depender de la textura del suelo, por ejemplo, un suelo arenoso elimina los excesos en menos tiempo que un suelo arcilloso (Villalobos, 2008).

3.6.9 Punto de Marchitez Permanente (PMP)

Es el punto en donde el faltante de agua es tal que la planta es incapaz de recuperarse, aunque se aplique riego o se cambie a un lugar con humedad por lo que es sumamente importante que no se llegue a este punto (Villalobos, 2008).

3.7 Parámetros de diseño y caudales requeridos para el riego por surcos.

En riego por surcos la superficie del suelo está ondulada formando pequeños canales, a lo largo de los cuales circula el agua de forma libre. Una característica importante del riego por surcos es que la parcela puede tener una pendiente lateral.



Figura 3. Riego por surcos en el cultivo de caña de azúcar

Para implementar un sistema de riego por surcos se utilizan varias metodologías, con base a diferentes pruebas en suelos de diferentes texturas que dan valores aproximados de los diferentes parámetros de riego.

Para obtener parámetros válidos es necesario llevar a cabo pruebas de campo para definir en forma técnica la dosis de riego a aplicar.

Según Villalobos (2008) el diseño implica darles valores a los siguientes parámetros:

- Longitud y espaciamento de los surcos.
- Caudales de agua que se requieren.
- Tiempos necesarios para completar el riego.
- Pendientes y direcciones que se le deben dar a los surcos.

3.7.1 Forma del surco y espaciamento.

Existen formas triangulares, parabólicas o trapezoidales para los surcos. La forma del surco, se encuentra en función de los implementos a disposición, técnica y maquinaria que se utilice para su construcción y del tipo de suelo que se tenga.

Los surcos generalmente tienen una profundidad de 15 a 20 centímetros, y un ancho en la parte superior de 25 a 30 centímetros (Villalobos, 2008).

En suelos arcillosos, el movimiento del agua es mayor en el sentido lateral que vertical, por lo cual construyen surcos anchos y poco profundos. Por otro lado, en suelo de textura arenosa el movimiento del agua es mayor en el sentido vertical que lateral.

En cuanto a la separación del surco, se calcula en función del cultivo a regar. Cada cultivo por su anatomía de raíz presenta un espaciamento fijo recomendado. Además, se debe considerar la maquinaria a utilizar con el fin de aprovechar los espaciamentos para realizar las labores mecanizadas.

3.7.2 Pendiente y orientación de surcos.

Existen recomendaciones de pendientes adecuadas en los surcos en función de la textura del suelo, pero debemos recordar que la pendiente del surco está directamente relacionada con la eficiencia de riego.

La orientación de los surcos deberá ser en sentido de la mayor pendiente, sin que rebase los límites que se marcan para el diseño, por esto mismo se debe de calcular tanto la pendiente longitudinal como transversal.

3.7.3 Caudal a aplicar al surco.

Al igual que en los canales, el caudal que puede conducir un surco depende de la sección de escurrimiento y de sus condiciones hidráulicas. Si el caudal es muy grande puede provocar erosión.

Para la primera etapa del riego se ha definido el caudal máximo no erosivo ($Q_{\text{máx}}$), el cual es el caudal máximo que se le puede aplicar al surco sin ocasionar erosión.

La mayoría de autores proponen ecuaciones para el caudal máximo no erosivo en función únicamente de la pendiente, pero se deben tomar en cuenta factores de suelo, tales como textura y erodabilidad

Aunque hay diversas fórmulas para la determinación del caudal máximo no erosivo, lo ideal es llevar a cabo prueba de campo con diferentes caudales y poder cuantificar un caudal máximo que no produzca erosión en el suelo (Villalobos, 2008).

Una vez que el agua ha llegado al final del surco, se debe satisfacer solamente la velocidad de infiltración que tiene el suelo, durante un tiempo igual al necesario para que quede depositada la lámina de riego que se requiere.

Una manera de calcular el caudal de infiltración es llevando el valor de la infiltración promedio del suelo a caudal. Para hacer esto se debe de multiplicar el valor de la infiltración promedio por el área del surco, la cual será el ancho del mismo por su longitud.

Por comodidad algunas veces se calcula el caudal de infiltración como la mitad del caudal máximo no erosivo.

3.7.4 Tiempo de aplicación.

Es la duración que debe tener el riego, o sea, el tiempo necesario para que la lámina neta se infiltre, más el tiempo necesario para que el caudal máximo no erosivo ($Q_{\text{máx}}$), llegue al final del surco que se le está aplicando el agua.

Con el fin de evitar pérdidas por percolación el agua debe llegar el extremo final del surco, en un tiempo que se ha establecido en la cuarta parte del tiempo necesario para que la lámina de riego se infiltre, esto es el tiempo de avance (T_a).

Lo que interesa es humedecer el suelo, con la lámina que éste requiere, por lo tanto, al final del surco el agua debe permanecer un tiempo necesario para que se infiltre esa lámina, esto es el tiempo de infiltración (T_i).

El tiempo de aplicación será la suma del tiempo de avance más el tiempo de infiltración.

3.7.5 Longitud del surco

La elección de la longitud del surco es de gran importancia en un diseño de riego e implica el análisis de múltiples factores.

Con el fin de hacer más eficiente las actividades de mecanización, optimizar el área de cultivo y el costo en la mano de obra, comúnmente se aumenta la longitud del surco. Por otro lado, con el fin de reducir las pérdidas por percolación, se hacen surcos más pequeños.

Según Villalobos (2008), los principales factores que se deben tener en cuenta para elegir la longitud del surco están:

- Tamaño del área y la forma
- Pendiente
- Tipo de suelo
- Cultivo
- Caudal

3.7.6 Profundidad de raíces.

El riego se debe aplicar según la profundidad radicular del cultivo de manera que se eviten pérdidas por percolación.

Según Sandoval (2007) para determinar la zona radicular de diseño es necesario examinar el crecimiento de la misma en las condiciones del suelo del área a regar. Lo

anterior es muchas veces difícil de lograr, lo que hace necesario consultar cuadros con experiencias de otras regiones.

3.7.7 *Evapotranspiración.*

La evapotranspiración es la suma del agua que se consume en un cultivo. Están involucradas la evaporación del agua en el suelo, la evaporación del agua que se encuentra sobre las hojas de las plantas y la transpiración que sufre el cultivo.

3.7.7.1 Evaporación potencial (Eto)

Eto es un valor de referencia, y define la evaporación que ocurriría en un área extensa de gramíneas de 8 a 15 centímetros de altura, uniforme, en activo crecimiento, que proyecta sombra sobre la totalidad de la superficie del terreno y que no le falta agua (Villalobos 2008).

3.7.7.2 Evapotranspiración real (Etr)

La evaporación real va a depender del cultivo que se tenga y se obtiene multiplicando la evapotranspiración potencial por un coeficiente de cultivo que se explica en el siguiente apartado.

3.7.7.3 Coeficiente de cultivo (Kc)

El coeficiente de cultivo es obtenido experimentalmente para cada cultivo a partir de la medición de las evapotranspiraciones reales y potenciales en donde $Kc = Etr/Eto$. Ya existen cuadros elaborados para gran cantidad de cultivos en sus diferentes etapas de desarrollo (Villalobos 2008).

Cuadro 2. Valores de Kc para caña de azúcar según FAO.

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Etapas de desarrollo	Inicial			Desarrollo			Media			Final		
Kc cultivo	0,37	0,37	0,37	0,62	0,62	0,62	1,23	1,23	1,23	0,88	0,88	0,88

3.7.8 Lámina neta (L_n).

La lámina neta es la lámina de agua que puede absorber el suelo sin desperdicio desde la capacidad de campo hasta el punto de marchitez permanente. Esta lámina se calcula de acuerdo a la profundidad radicular a la que se quiere llegar dependiendo del cultivo. La idea es que el cultivo se mantenga entre el CC y el PMP de manera que no se dañen las plantas ni se desperdicie agua, por ello se calcula la lámina neta con un agotamiento permisible.

Cuando el suelo tiene varias capas se debe conocer la profundidad radical del cultivo que se quiere regar y obtener la lámina neta para cada horizonte y hacer la sumatoria para obtener la lámina neta que se desea aplicar al suelo.

3.7.9 Lámina bruta (L_b).

Cuando regamos existen pérdidas en la cantidad de agua que aplicamos, ya que ningún método es 100% eficiente. Estas pérdidas pueden ser por percolación profunda, escorrentía, evaporación u otros. Debido a estas pérdidas una vez que se calcula la lámina neta se debe considerar la eficiencia de aplicación que se tiene en cada caso, de manera que pueda calcularse la cantidad de agua real que se debe suministrar en el sistema. Esta nueva lámina se llama lámina bruta.

Según Villalobos (2008) el problema que se tiene cuando se diseña es que no se conoce la eficiencia de aplicación, por lo que se deben asumir valores en función de experiencias con diversos métodos de riego, tipos de suelo y condiciones climáticas.

4 Metodología

4.1 Localización física del área de estudio.

El estudio se llevó a cabo en la Finca Experimental de la Universidad Técnica Nacional, Sede Guanacaste, anteriormente Colegio Universitario para el Riego y Desarrollo del Trópico Seco (CURDTS), coordenadas N 10° 20,01' y O 85° 08,01'. Esta finca está ubicada en la zona de vida Bosque tropical seco, caracterizada por dos estaciones climáticas bien definidas, una seca que va de noviembre a mayo y otra lluviosa de mayo a noviembre. La

altitud promedio en las áreas irrigadas es de 12 msnm y la precipitación promedio anual es de 1 670 mm, con temperaturas medias anuales que varían de 24 °C a 36 °C.

La geología de la zona está compuesta de cerros formados por rocas sedimentarias y las partes bajas de relieve plano son depósitos aluvionales de los ríos que riegan la zona (Alfaro, 2005).

Según Vásquez (1977) los suelos que forman parte de la Finca Experimental de la Universidad Técnica Nacional, ubicada en el distrito Bebedero, cantón de Cañas, provincia de Guanacaste, están agrupados en ocho series. Entre éstas está la Serie Cascante, cuyos suelos muestran diferentes profundidades; esta característica conllevó que la Serie Cascante se subdividiera en diferentes fases. La fase de suelos profundos se utilizó para realizar este trabajo de investigación.

En la Figura 4 se muestra la localización de los lotes en estudio, de las calicatas analizadas en esta investigación y de la calicata analizada por Vásquez (1977). Además en el Cuadro 3 se muestran las coordenadas en proyección CRTM05 de las calicatas estudiadas en esta investigación.

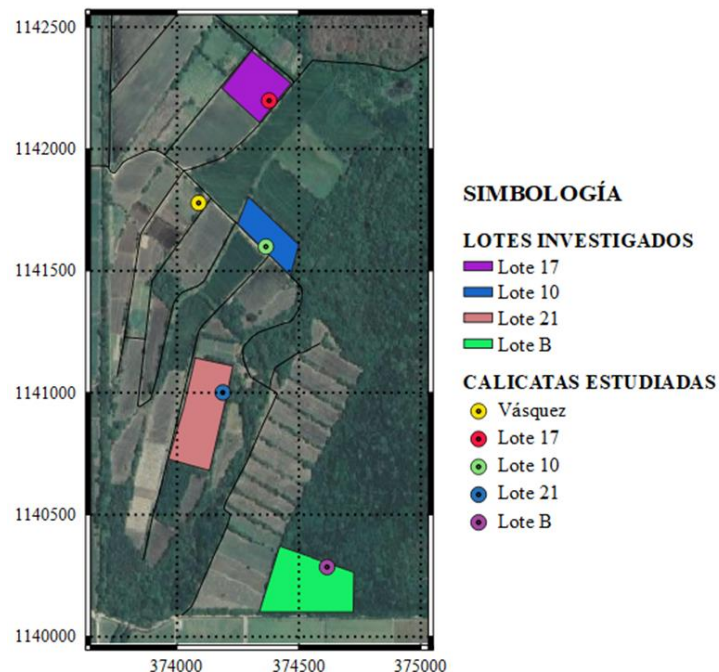


Figura 4. Localización de los lotes en estudio y de las calicatas estudiadas.

Cuadro 3. Coordenadas de las calicatas estudiadas en coordenadas CRTM05

Calicata	Este	Norte
Lote 17	374375,69	1142196,93
Lote 10	374362,28	1141597,47
Lote 21	374185,47	1140998,60
Lote B	374618,64	1140282,31
Vásquez (1977)	374086,33	1141776,69

4.2 Descripción de los lotes donde se ubica el estudio.

4.2.1 Caña sin renovación de cepas (Lote 17).

Este es un lote sembrado con caña de azúcar, variedad NA56-42; se localiza en el sector oeste de la finca, tiene un área de 9,4 has. Los suelos son del orden Mollisol clasificados como Fluventic Haplustoll, con régimen de temperatura isohipertérmico y presentan una textura franca arcillo-arenosa. Este lote tiene un sistema de manejo de cepa permanente, esto es solamente producción de caña sin renovación de cepas. La cepa sembrada tiene una edad de 10 años. En los años 2011 y 2012 se le realizó a este lote aplicaciones de vinaza al suelo como práctica para mejorar el contenido de potasio disponible.

4.2.2 Rotación caña – caña (Lote 10).

Este es un lote sembrado con caña de azúcar variedad NA56-42; se localiza en el sector suroeste de la finca, tiene un área de 3 has. Los suelos son del orden Mollisol, clasificados como Fluventic Haplustoll, con régimen de temperatura isohipertérmico y presentan una textura franco arcillo-arenosa. Este lote tiene un sistema de manejo agronómico convencional con renovación de cepa cada cinco años, la cepa actual es una segunda renovación y tiene cinco años de sembrada.

4.2.3 Rotación caña – arroz – caña (Lote 21).

Este es un lote sembrado con caña de azúcar variedad NA56-42; se localiza en el sector oeste de la finca, tiene un área de 9,4 has. Los suelos pertenecen al orden Mollisol,

clasificados como Fluventic Haplustoll, con régimen de temperatura isohipertérmico y presentan una textura franca arcillo-arenosa. Este lote tiene un sistema de manejo agronómico de rotación caña – arroz – caña; la rotación se estableció con la siguiente secuencia: cultivo de caña con vida útil de la cepa de cinco años, después se siembra arroz con dos ciclos por año por dos años y se cierra la rotación nuevamente con un ciclo de caña de cinco años. La cepa actual fue sembrada luego de la rotación con arroz y tiene 3 años de establecida.

4.2.4 Palmar en regeneración natural (Lote B).

Este lote se encuentra cubierto mayormente por palma real (*Roystonea regia*), sembrada hace más de 40 años con el fin inicial de drenar el humedal existente y habilitar más área agrícola. Entre palmas han crecido algunos árboles autóctonos de la región como cenízaro (*Samanea saman*), gallinazo (*Schizolobium parahyba*), guayaquil (*Albizia guachapele*), guanacaste (*Enterolobium cyclocarpum*), entre otros. Esta área tiene más de 25 años de estar en un proceso de regeneración natural, tiene una extensión de 10 hectáreas, con suelos del orden Mollisol, clasificados como Fluventic Haplustoll, con régimen de temperatura isohipertérmico y una textura franco arcillo-arenosa. Esta área fue incluida en este estudio como una condición de testigo, pues al no haber sido nunca cultivada es un escenario comparativo para valorar el impacto del cultivo de caña de azúcar, bajo diferentes manejos agronómicos, sobre el suelo.

Es importante indicar que para estos tres lotes sometidos a estudios el plan de fertilización y manejo de plagas y enfermedades no tienen diferencias, lo que nos lleva a determinar que el manejo que se aplica en estos lotes no va a determinar las diferencias productivas para cada uno de ellos.

4.3 Determinación del Índice de Calidad para los suelos de la Finca Experimental UTN.

Los índices se establecieron según la metodología de Storie (1970), que propone cuatro factores generales con diferentes parámetros para cada uno de ellos.

4.3.1 Determinación del Factor A o perfil del suelo.

Para determinar este factor se cavaron calicatas en cada lote con las siguientes medidas; 1,0 metros de ancho, 1,5 metros de largo y 1,0 metros de profundidad. Luego se realizó la identificación de los horizontes y de la profundidad efectiva; para cada horizonte se determinó el desarrollo de la estructura, consistencia del material, acumulación de arcilla iluviada y presencia de capas restrictivas al crecimiento radical. Luego se tomaron las muestras disturbadas e indisturbadas en los primeros 0,20 m, para los análisis físicos, químicos y biológicos requeridos para la estimación de los factores A, B, y X.

4.3.2 Determinación del Factor B o aspectos texturales del suelo.

Para su determinación se hizo un análisis físico del suelo, para lo cual se tomaron doce muestras indisturbadas de suelo, tres por lote a una profundidad de 0,20 m. Los análisis se realizaron en el Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica para obtener la humedad a capacidad de campo, a punto de marchitez permanente y la estabilidad de agregados. También se tomaron tres muestras indisturbadas por cada lote y se llevaron al Laboratorio de Aguas de la Universidad Técnica Nacional, Sede Guanacaste, para determinar la densidad aparente y la porosidad. Además, se realizaron pruebas de infiltración en campo en cada uno de los lotes por el método de los anillos infiltrómetros.

4.3.3 Determinación del Factor C o pendiente del suelo.

Mediante el uso de nivel topográfico y estadia se tomaron las pendientes y las distancias establecidas para cada lote. Debido a que estos lotes son mecanizados las pendientes son bajas.

4.3.4 Determinación del Factor X.

Para determinar este factor se midieron los parámetros descritos por Storie (1970). Dentro de este factor existen características físicas y químicas del suelo.

Para obtener los valores de las características drenaje, erosión y microrrelieve se realizaron pruebas de campo.

En cuanto a las características químicas se tomaron muestras disturbadas de suelo en los cuatro lotes que se sometieron a evaluación; cada lote se dividió en tres bloques, en cada bloque se tomaron 10 submuestras a 0,20 m de profundidad, cada grupo de submuestras conformó una muestra compuesta para un total de tres muestras compuestas en cada lote. Cada una de estas muestras compuestas se cuarteó y se preparó para enviarlas al Laboratorio de Suelos y Foliare del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica, para realizar los análisis químicos para los elementos P, K, Fe, Cu, Zn, y Mn. La metodología utilizada para la extracción de estos nutrientes fue Olsen modificado; para determinar la acidez intercambiable (valor H^+), Ca y Mg se utilizó como solución extractora KCL 1 M. Para determinar la capacidad de intercambio de cationes efectiva (CICE), se realizó la sumatoria de $Ca + Mg + K + Al + H$ y para determinar boro y azufre se utilizó la metodología de extracción con una solución de fosfato de calcio.

Debe indicarse que como “línea base”, esto es la caracterización fisico-química de los suelos estudiados previa a su uso con el cultivo de caña, se tomó el estudio de clasificación de suelos de la Finca Experimental realizado por Vásquez en el año 1977.

4.4 Cuantificación de las características biológicas.

Se tomaron muestras de suelo en los cuatro lotes que se sometieron a evaluación; cada lote se dividió en tres bloques, en cada bloque se tomaron 10 submuestras a 0,20 metros de profundidad, cada grupo de submuestras conformó una muestra compuesta, para un total de tres muestras compuestas en cada lote. Cada una de estas muestras compuestas se cuarteó y se preparó para enviarla al Laboratorio de Microbiología Agrícola en el Centro de Investigaciones Agronómico de la Universidad de Costa Rica. Los análisis realizados fueron los siguientes: recuento de bacterias, recuento de hongos, recuento de actinomicetos y respiración basal del suelo. Además, se incluyó la identificación de bacterias dominantes y la identificación de hongos dominantes.

Cabe señalar que los porcentajes informador por Vásquez (1977) se determinaron por el método de oxidación en húmedo, pero los datos de ésta variable presentados en esta investigación fueron procesados por el método de incineración, lo cual podría presentar algunas diferencias.

4.5 Parámetros de diseño y caudales para riego por surcos.

Para obtener los parámetros de diseño y caudales para riego por surcos de cada uno de los lotes cultivados en estudio, se tomó en cuenta los resultados de los análisis físicos, las pruebas ejecutadas en campo, datos obtenidos por revisión bibliográfica y valores obtenidos en la praxis del Distrito de Riego Arenal Tempisque (DRAT) y la Universidad Técnica Nacional. Dentro de los de las variables para el diseño de riego se midieron:

- Capacidad de campo (CC)
- Punto de marchitez permanente (PMP)
- Densidad aparente (Da)
- Profundidad radicular (Prof. Radicular)
- Agotamiento permisible (Agot.)
- Eficiencia de aplicación y conducción (Eficiencia)
- Pendiente de los lotes (S)
- Sentido de riego (S. Riego)
- Separación entre surcos (W)

5 Resultados y análisis.

5.1 Determinación del Índice de Calidad según Storie para los suelos mollisoles cultivados con caña de azúcar y bajo diferentes manejos agronómicos.

5.1.1 Determinación del Factor A o perfil de suelo.

Según los estudios de campo realizados estos suelos tienen un relieve plano (pendiente menor a 2%) con profundidades mayores a los 95 cm, a esta profundidad se encontró una capa arenosa. La textura de los horizontes A en cada lote es franco arcillo-arenosa. Tres de los suelos presentaron buen drenaje, y sólo el lote rotación caña – caña (Lote 10) presentó condiciones de drenaje regular; esta diferencia se relaciona con el manejo de éste, ya que no presenta drenes colectores de agua de escorrentía a diferencia de los otros lotes.

Las calicatas presentaron cuatro horizontes a los 100 centímetros de profundidad (Cuadro 4), los cuales se categorizaron en Ap, A12, B2, C1, igual a la categorización

reportada por Vásquez (1977) en sus estudios. En el lote palmar en regeneración natural (Lote B) la secuencia de horizonte fue A11, A12, B2 y C1.

Cuadro 4. Descripción de los horizontes del suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote17), caña-caña (Lote10), caña-arroz-caña (Lote 21) y palmar en regeneración natural (Lote B) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica.

Variables	Lote 17				Lote 10				Lote 21				Lote B				Vásquez (1977)			
Horizontes	Ap	A12	B2	C1	Ap	A12	B2	C1	Ap	A12	B2	C1	A11	A12	B2	C1	Ap	A12	B2	C1
Profundidad Inicial (cm)	0	22	43	99	0	22	40	82	0	20	45	89	0	25	50	100	0	10	45	65
Profundidad final (cm)	22	43	99	>100	22	40	82	>100	20	45	89	>100	25	50	100	>100	10	45	65	95
Espesor de los horizontes (cm)	22	21	56		22	20	42		20	25	44		25	25	50		10	35	20	30
Calificación Storie (1970) (%)	95				95				95				95				95			

El horizonte Ap presentó un grosor entre 20 a 25 centímetros en los diferentes lotes estudiados, bien estructurado y con una coloración oscura (10YR2.5/1). Según Gilbert et.al. (2010) este es un horizonte móllico que presenta alta saturación de bases y alto contenido de materia orgánica, características que coinciden con las encontradas en el post estudio y por Vásquez (1977). El horizonte A12 presentó un grosor que varió de 20 a 25 centímetros menor al encontrado por Vásquez (1977), pero en la sumatoria del grosor del actual horizonte A (Ap + A12) no hubo diferencias entre el estudio actual y el de Vásquez (1977) (promedio 45 centímetros) (Cuadro 4).

De acuerdo al estudio de las calicatas éstas no presentaron diferencias entre los suelos evaluados, en cuanto a categorización y grosor de los horizontes, ya que los diferentes manejos agronómicos tuvieron una afectación similar. En cuanto al lote palmar en regeneración natural (Lote B), se observó que el grosor del horizonte A11 es mayor a los lotes estudiados, debido probablemente a que este lote con cubierta vegetal por 40 años ha sufrido una menor erosión.

Como lo dispone la metodología de Storie (1970), los suelos estudiados pertenecen al grupo de perfil II, al cual se les asigna una ponderación del Factor A de un 95% igual al valor asignado al estudio base de Vásquez (1977) (ver Anexo 2).

5.1.2 Determinación del Factor B o aspectos texturales del suelo.

Los suelos Mollisoles bajo diferentes manejos agronómicos estudiados presentaron una textura franco arcillo-arenosa (Cuadro 5), pero presentan algunas diferencias en los porcentajes de su granulometría, especialmente en el contenido de arcilla, que pueden llegar a ser significativas en su funcionamiento.

Cuadro 5. Variables físicas del suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote10), caña-arroz-caña (Lote 21) y Palmar en regeneración natural (Lote B) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica.

Variable	Parámetro	Lote 17	Lote 10	Lote 21	Lote B	Vásquez
	Profundidad (cm)	0 - 20	0 - 20	0 - 20	0 - 20	0 - 20
Granulometría	Arcilla (%)	27,0	29,0	22,0	32,0	38,0
	Limo (%)	26,0	25,0	26,0	18,0	17,2
	Arena (%)	47,0	46,0	52,0	50,0	44,8
	Textura	FAa	FAa	FAa	FAa	FA
Retención de humedad (%)	C.C (%)	30,0	31,0	29,0	32,0	30,9
	P.M.P (%)	18,0	18,5	17,0	22,0	15,8
	Agua Útil (%)	12,0	12,5	12,0	10,0	15,1
Otras variables	Densidad aparente (g/cm ³)	1,22	1,24	1,44	1,25	1,64
	Porosidad (%)	53,1	52,3	44,6	51,9	36,92
	Agregados estables (%)	56,0	43,0	55,0	63,0	Np
	Infiltración básica (mm/h)	5,70	5,45	4,79	6,09	6,0

Los valores de agua útil encontrados en esta investigación variaron de 12,5% en el lote caña-caña (Lote 10) a 10% en el lote palmar en regeneración natural (Lote B). En el estudio base Vásquez (1977) se informa un valor de 15,1% para agua útil.

Según Ortega y Acevedo (1999) suelos con textura franco arcillo-arenosa presentan valores de capacidad de campo de 27 a 35% con una media de 31%, y valores de punto de marchitez permanente de 13 a 17% con una media de 15%, para ámbitos de agua útil de 12 a 18%; similares a los encontrados en este estudio. Cabe mencionar que el estudio base de Vásquez (1977) informa de valores de constantes de humedad muy cercanos a los hallados en el presente estudio.

La densidad aparente (D_a) a menudo se utiliza en los estudios de calidad de suelos como un indicador de la resistencia mecánica del suelo para el crecimiento de raíces. Los valores de densidad aparente determinados en esta investigación (Cuadro 5) van de 1,44 (g/cm^3) para el lote de rotación caña – arroz – caña (Lote 21) a 1,22 (g/cm^3) para el lote caña sin renovación de cepas (Lote 17). Para suelos mollisoles de la Región Pampeana de Argentina, Wilson et al. (2013) hallaron valores críticos de D_a de 1,37 g/cm^3 , por encima de este valor se observaron reducciones en el desarrollo radicular del cultivo; estos valores son similares a los que presentaron Ortega y Acevedo (1999), quienes indican que para suelos arcillo arenosos los valores de densidades aparentes normales son de 1,2-1,4 g/cm^3 , con media de 1,30 g/cm^3 . Los valores encontrados en esta investigación se encuentran en el ámbito citado anteriormente con excepción del lote con rotación caña – arroz – caña (Lote 21) que presentó el valor mayor y que podría indicar un posible proceso de densificación causado probablemente por la mecanización intensa que se realiza en los ciclos de arroz.

El valor promedio determinado por Vásquez (1977), estudio de base, de 1,24 g/cm^3 es similar a los hallados en el presente estudio.

Respecto al porcentaje de poros de los suelos de los lotes analizados se observaron valores porcentuales de 53,1% para el lote caña sin renovación de cepas (Lote 17), 52,3% para el lote rotación caña – caña (Lote 10), 44,6% para el lote rotación caña – arroz – caña (Lote 21) y el lote palmar en regeneración natural (Lote B) presentó un valor de 51,9% (Cuadro 5), a excepción del Lote 21 todos los suelos evaluados presentaron valores de porosidad superiores a 50 %. En este sentido Flores (2010) indica que porcentajes de porosidad que están en un intervalo de 50 a 60% se consideran altos.

El Lote 21 presentó la menor porosidad 44,6% que según Flores (2010) es una porosidad media. Este valor es una consecuencia del valor alto de Da hallado y de nuevo muestra un posible proceso de densificación en este manejo (caña – arroz – caña).

En cuanto a la velocidad de infiltración (Cuadro 5), se observan valores de 5,7 mm/h para el lote caña sin renovación de cepas (Lote 17), para el lote rotación caña – caña (Lote 10) de 5,45 mm/h 4,79 mm/h para el lote rotación caña – arroz – caña (Lote 21) y 6,09 mm/h para el lote palmar en regeneración natural (Lote B). Los valores determinados en los lotes 17, 10 y B se consideran normales, ya que según Villalobos (2008) para suelos francos arcillosos los valores de infiltración usuales se encuentran en un intervalo de 5 a 10 mm/h. El menor valor se observó en el Lote 21 con la tendencia ya señalada que apunta a un proceso de densificación de ese suelo.

Los valores presentados por Vásquez (1977) en el estudio base se encuentran dentro del intervalo hallado de infiltración en el presente estudio.

De acuerdo a la clasificación textural según la metodología de Storie (1970), el valor ponderado del Factor B para cada uno de los suelos en estos lotes es de un 95% que corresponde a la clase textural media, migajón arcilloso calcáreo (CL). Los análisis realizados por Vásquez (1977) para estos suelos indicaron texturas franco arcillosos (CL) que se ubican en el mismo grupo textural según Storie (1970) y por tanto se le asigna al estudio base de Vásquez (1977) también un valor de 95% (Anexo 2).

En el siguiente cuadro se muestra la clasificación de Storie del Factor B de los suelos para cada uno de los manejos analizados.

Cuadro 6. Calificación según Storie (1970) del Factor B para el suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10), caña-arroz-caña (Lote 21) y palmar en regeneración natural (Lote B) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica.

Descripción	Lote 17	Lote 10	Lote 21	Lote B	Vásquez (1977)
Textura	Franco Arcillo arenoso	Franco Arcillo arenoso	Franco Arcillo arenoso	Franco Arcillo arenoso	Franco Arcilloso
Clase: textura media	SL	SL	SL	SL	CL
Calificación Storie (1970)	95%	95%	95%	95%	95%

5.1.3 Determinación del Factor C o pendiente.

Los lotes en estudio han sido sometidos a nivelaciones para la adecuación parcelaria, independientemente del manejo agronómico, por lo cual las pendientes han disminuido a valores inferiores al 0,5%, acción que sitúa a los suelos en una pendiente casi a nivel (Clase A) y una calificación según Storie (1970) de 100%. En cuanto al Lote B se mantiene como suelo con pendiente ligeramente ondulada (Clase AA) y una calificación según Storie (1970) también de 100%.

Vásquez (1977) en el estudio base señala que los suelos son planos, con gradientes inferiores al 1,0%, hecho que ubica a estos suelos en una pendiente ligeramente ondulada (Clase AA) y la correspondiente calificación según Storie (1970) es de 100%.

Cuadro 7. Calificación según Storie (1970) del Factor C del suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10), caña-arroz-caña (Lote 21) y palmar en regeneración natural (LOTE B) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica.

Descripción	Lote 17	Lote 10	Lote 21	Lote B	Vásquez (1977)
Pendiente	0,4%	0,4%	0,3%	0,9%	menor a 1,0%
Clase: casi a nivel (A) a ligeramente ondulada (AA)	A	A	A	AA	AA
Calificación Storie (1970)	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

5.1.4 Determinación del Factor X.

Según Storie (1970) para poder definir el Factor X se debe tomar en cuenta los parámetros de drenaje, erosión, microrrelieve, sales medidas por medio de conductividad eléctrica (CE), disponibilidad de nutrimentos, acidez, capacidad de intercambio de cationes (CIC) y acidez (pH), cuyos valores se encuentran en el Cuadro 8 y Cuadro 9.

5.1.4.1 Drenaje.

Para determinar el drenaje de los suelos evaluados en este estudio se tomó como parámetro la profundidad de ellos y la variación del nivel freático; es importante destacar que según el análisis de la calicata estos son suelos profundos que se caracterizan por formar una capa arenosa a partir de los 95 centímetros de profundidad, que causa buenos drenajes. Lo anterior concuerda con los análisis de drenaje informados por Vázquez (1977) en el estudio base de estos mollisoles, quien señala que estos suelos presentan buen drenaje asociado a su textura media y permeabilidad.

Basado en los criterios de Storie (1970) y de acuerdo a la textura, los resultados permiten ubicar a estos mollisoles con excepción del lote rotación caña – caña (Lote 10) en el grupo de suelos con buen drenaje con texturas medias y se les asigna un valor ponderado de 100%, sin diferenciarse de las condiciones informados por Vázquez (1977) (Cuadro 10) (Anexo 2).

Los análisis de drenaje del lote rotación caña – caña (Lote 10) mostraron un nivel freático muy superficial. Esta condición tiene una incidencia negativa sobre el drenaje durante la época lluviosa, pues permanece con agua por más de dos días, por tanto, se categorizó como un suelo con un drenaje regular. Ésta condición también se refleja en los rendimientos promedios de cuatro años, obteniendo un valor de 5,89 toneladas de azúcar por hectárea.

Debido a las condiciones de drenaje regular de este lote, el valor ponderado según la calificación del índice de Storie (1970) es de 90%.

Entre los factores que afectan el drenaje en Lote 10 están la aplicación de láminas excesivas de agua durante la época de riego y el relieve muy bajo de este sector de la finca

que provoca una gradiente hidráulica insuficiente para el drenaje natural. Además, este lote no cuenta con drenes colectores para evacuar el remanente de agua sobre la superficie a diferencia de los otros lotes.

5.1.4.2 Erosión.

Otra variable que tiene importancia en el Factor X es la erosión, que Lal (2001) define como “la pérdida físico-mecánica del suelo, con afectación en sus funciones y servicios eco sistémicos, que produce, entre otras, la reducción de la capacidad productiva de un suelo”. Todos los suelos con alguna pendiente y poca vegetación están expuesto a procesos erosivos. Según Storie (1970), la erosión se intensifica cuando se realiza la eliminación de la cubierta vegetal protectora del suelo, cuando se presentan lluvias intensas, sobrepastoreo, eliminación de los bosques y cuando se realiza labores en el cultivo pocos adecuadas en forma y tiempo.

Respecto a la erosión que presentan los suelos con diferentes manejos de cultivo de caña estudiados, se observó que los tres lotes cultivados presentaron una erosión laminar moderada, esto permite asignar un valor de 95% según la escala de Storie (1970) para esta variable (Cuadro 11) (Anexo 2).

Al compararse con el estudio base elaborado por Vásquez (1977), se observó que ha habido cambios, ya que en ese estudio se indica que los suelos presentan una superficie plana, con una erosión de “nada a ligera”, así se debe asignar a esa variable en el estudio base (Vásquez, 1977) según Storie (1970) un valor de 100%.

5.1.4.3 Microrrelieve.

En este estudio todos los suelos analizados, independientemente del manejo agronómico, presentaron un microrrelieve liso, donde según Storie (1970) se les asigna una calificación ponderada de 100%. Esta variable ha tenido un cambio con respecto a la descripción del microrrelieve realizada por Vásquez (1977) en el estudio base; las diferencias se deben a los procesos de adecuación que han sido sometidos los suelos. Las pendientes actualmente son menores al 0,5% y planas. Debe indicarse que el microrrelieve encontrado en el lote palmar en regeneración natural (Lote B) es ligeramente ondulado,

similar al estudio base de Vásquez (1977), esta característica permite clasificar este lote en una categoría de microrrelieve de montículos bajos, con un valor ponderado de 95% (Cuadro 11) (Anexo 2).

5.1.4.4 Conductividad eléctrica.

La conductividad eléctrica (CE) del suelo es la capacidad de conducir la corriente eléctrica, la cual depende de la cantidad de iones positivos y negativos que se encuentran en la solución de un suelo (Bosch, et al. 2012), por eso la CE de la solución de suelo es un indicador del contenido de sales.

Los valores encontrados en este estudio se presentan en el Cuadro 9. Los lotes evaluados presentaron valores de conductividad eléctrica que se encuentran en un intervalo de 0,10 a 0,17 mS/cm, por lo que se encuentran por debajo de los valores de referencia, ya que según el USDA (1999) cuando la conductividad eléctrica se encuentra en el intervalo de 0,00 a 0,98 mS/cm, los suelos son considerados no salinos y los efectos de las sales son casi despreciables y pocos organismos se ven afectados; por lo tanto los suelos evaluados, son considerados no salinos, lo que permite asignarles una calificación de 100% según la metodología de Storie (1970) (Anexo 2).

5.1.4.5 Capacidad de Intercambio de Cationes Efectiva (CICE).

Los valores de CICE encontrados en este estudio son altos, pues van de 30,12 cmol(+)/L en el suelo cultivado con caña de azúcar sin renovación de cepa (Lote 17) a 34,08 cmol(+)/L en el lote palmar en regeneración natural (Lote B). Estos valores muestran que los suelos tienen una alta fertilidad, ya que de acuerdo con Bertsch (1987) un valor de CICE mayor a 10 cmol(+)/L indica suelos muy fértiles.

La CICE informada por Vásquez (1977) en su estudio base arroja un valor de 35,2 cmol(+)/L, que no difiere de los valores hallados en el presente trabajo.

5.1.4.6 Acidez del suelo (pH).

Los valores de pH hallados para los distintos manejos presentan diferencias mínimas que van de 6,50 en el lote rotación caña – arroz – caña (Lote 21) a 7,0, en el lote palmar en

regeneración natural (Lote B). Estos valores se ubican, según la metodología de Storie (1970), en el grupo “ligeramente ácido” y se le asigna un valor ponderado de 95% (Cuadro 11) (Anexo 2),

Cuadro 8. Parámetros de acidez y conductividad eléctrica (CE) del suelo mollisol en los lotes: caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10), caña-arroz-caña (Lote 21) y palmar regeneración natural (Lote B) de la Finca Experimental de la UTN, Sede Guanacaste.

Parámetro	Lote 17	Lote 10	Lote 21	Lote B	Vásquez (1977)
Saturación de bases %	99,97	99,67	99,67	99,72	99,57
Suma de bases en cmol(+)/L	30,02	30,52	32,52	33,99	35,10
CICE cmol(+)/L	30,12	30,62	32,64	34,08	35,25
Acidez intercambiable en cmol(+)/L	0,10	0,11	0,12	0,09	-
% de saturación de acidez	0,33	0,33	0,40	0,27	-
CE en mS/cm	0,17	0,10	0,10	0,17	-

Vásquez (1977) en su estudio base informa de un pH en H₂O de 6,9 en estos mollisoles, lo que de acuerdo al ámbito de acidez establecido por Storie (1970), este valor se encuentra en un ámbito entre 6,0-7,0 lo que ubica este suelo en el grupo “ligeramente ácido” muy cercano a la neutralidad y se le asigna un valor ponderado de 95%.

Respecto de la acidez intercambiable se hallaron valores óptimos, ya que en todos los casos los tenores fueron menores al valor crítico de 0,3 cmol(+)/L. Los valores variaron en un ámbito de 0,09 cmol(+)/L en el suelo del Lote B (palmar en regeneración natural) a 0,12 cmol(+)/L en el Lote 21 (rotación caña – arroz – caña). Vásquez (1977) en su estudio base no informa de valores de acidez intercambiable.

5.1.4.7 Contenido de nutrimentos.

Los resultados obtenidos muestran contenidos de suficiencia del elemento fósforo en cada uno de los suelos de los lotes sembrados con caña de azúcar, independientemente del manejo agronómico; los tenores variaron de 13,67 mg/L en el lote rotación caña – caña (Lote 10), a 31,00 mg/L en el lote palmar en regeneración natural (Lote B) (Cuadro 9).

Según Molina y Meléndez (2002) el intervalo óptimo de fósforo en un suelo va de 10 a 50 mg/L de P

Los valores de potasio encontrados en este estudio están en el ámbito de suficiencia independiente del manejo agronómico; los tenores variaron en un intervalo de 0,6 cmol(+)/L en el lote con rotación caña-arroz-caña (Lote 21) a 1,8 cmol(+)/L, en el lote caña sin renovación de cepa (Lote 17). Estos valores a excepción del Lote 21 son mayores a los informados por Vásquez (1977) en su estudio base, probablemente debido al efecto de la fertilización continua, en particular en el Lote 17 que recibió aplicaciones de vinaza.

Los valores de calcio (Ca) y de magnesio (Mg) se encuentra en un ámbito de suficiencia para los suelos indistintamente del manejo agronómico. El calcio se encuentra en un intervalo de 19,68 cmol/L para el Lote 17 (caña sin renovación de cepa) a 26,07 cmol/L para el lote palmar en regeneración natural (Lote B). El elemento magnesio presenta el mismo comportamiento del Ca, éste muestra valores en un ámbito de 6,66 cmol(+)/L para el lote palmar en regeneración natural (Lote B) a 9,46 cmol/L para el Lote 21 (rotación caña-arroz-caña); estos valores son mayores a los obtenidos por Vásquez (1977) en el estudio base.

Los micronutrientes hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), y cobre (Cu) son requeridos en pequeñas cantidades y se consideran esenciales en la nutrición de las plantas, porque la ausencia parcial o total de alguno de ellos provoca que la planta no pueda completar su ciclo vital. En la presente investigación se encontraron valores con poca variación entre los diferentes manejos, el contenido del elemento Zn varió de 2,53 mg/L a en el lote con rotación caña – arroz – caña (Lote 21) a 3,73 mg/L en el lote de rotación caña – caña (Lote 10); según Molina y Meléndez (2002) el nivel de insuficiencia para este nutriente es de 3 mg/L, tomando como base este valor crítico se infiere que el elemento Zn en estos lotes se encuentra en contenidos deficientes con excepción del lote 21 (rotación caña – arroz – caña).

Cuadro 9. Variables químicas del suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10), caña-arroz-caña (Lote 21) y palmar en regeneración natural (Lote B) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Guanacaste

Unidad	Variable	Lote 17	Lote 10	Lote 21	Lote B	Vásquez 1977
cm	Profundidad	0 - 20	0 - 20	0 - 20	0 - 20	0 - 20
	Ph - H ₂ O	6,63	6,70	6,53	6,97	6,90
cmol(+)/L	Acidez intercambiable	0,10	0,11	0,12	0,09	-
	Calcio	19,68	20,73	22,46	26,07	22,70
	Magnesio	8,53	8,82	9,46	6,66	6,50
	Potasio	1,80	0,97	0,60	1,26	0,90
	CICE	30,12	30,62	32,64	34,08	35,25
%	Saturación de Acidez	0,33	0,33	0,40	0,27	-
mg/L	Fósforo	16,00	13,67	14,00	31,00	-
	Zinc	2,67	3,73	2,53	2,20	-
	Cobre	9,00	10,00	11,00	5,33	-
	Hiero	37,00	43,33	27,67	18,67	-
	Manganeso	7,67	6,67	7,67	4,33	-

Los elementos Fe y Mn mostraron valores mayores al nivel de suficiencia en todos los lotes independientemente del manejo agronómico.

El Cu es un elemento que según Molina y Meléndez (2002), rara vez presenta contenidos de insuficiencia en los suelos, a menos que estos sean muy arenosos o bajos en materia orgánica. En el caso de los lotes estudiados los valores encontrados fueron altos, independiente del manejo agronómico.

Cabe señalar que los contenidos de elementos menores en general fueron mayores en los lotes cultivados con caña, respecto del lote palmar en regeneración natural (Lote B), debido probablemente a un efecto acumulativo de la fertilización.

De acuerdo a la metodología de Storie (1970) los contenidos de nutrimentos de los suelos en los diferentes manejos agronómicos son buenos y tienen un ponderado de 100% (Anexo 2).

A continuación, se presenta el resumen de los parámetros que conforman el Factor X y la correspondiente ponderación de este factor para los distintos manejos agronómicos de la caña de azúcar.

Cuadro 10. Calificación según Storie del Factor X del suelo mollisol en los lotes: caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10), caña-arroz-caña (Lote 21) y palmar en regeneración natural (Lote B) de la Finca Experimental UTN, sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica.

Parcela	Drenaje	%	Salino; álcali; condiciones tóxicas	%	Nutrientes	%	Acidez	%	Erosión	%	Microrrelieve	%	Factor X
Lote 17	Bien drenado	100%	libre	100%	Bueno	100%	Ligeramente Ácido	95%	Laminar moderada	95%	Liso	100%	90%
Lote 10	Drenaje regular	90%	libre	100%	Bueno	100%	Ligeramente Ácido	95%	Laminar moderada	95%	Liso	100%	81%
Lote 21	Bien drenado	100%	libre	100%	Bueno	100%	Ligeramente Ácido	95%	Laminar moderada	95%	Liso	100%	90%
Lote B	Bien drenado	100%	libre	100%	Bueno	100%	Ligeramente Ácido	95%	Nada a Liger	100%	Montículos bajos	95%	90%
Vásquez 1977	Bien drenado	100%	libre	100%	Bueno	100%	Ligeramente Ácido	95%	Nada a Liger	100%	Montículos bajos	95%	90%

5.1.5 Índice compuesto de Storie.

El índice compuesto de Storie (1970) para los lotes caña sin renovación de cepas (Lote 17), lote de rotación caña – arroz – caña (Lote 21) y lote palmar en regeneración natural (Lote B) fue de 81%, en tanto el lote de rotación caña – caña (Lote 10) presentó un índice de 73%; la diferencia se da en el Factor X específicamente en el aspecto de drenaje que presentó una mayor limitación en el lote de rotación caña – caña (Cuadro 11).

El índice de Storie (1970) calculado para el suelo Mollisol según el estudio base de Vásquez (1977) fue también de 81%.

Cuadro 11. Estimación de los índices de Storie con base en los Factores A, B, C y X del suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10), caña-arroz-caña (Lote 21) y Palmar en regeneración natural (Lote B) de la Finca Experimental de la UTN.

Parcela	Factor A	Factor B	Factor C	Factor X	Indice Storie
Lote 17	95%	95%	100%	90%	81%
Lote 10	95%	95%	100%	81%	73%
Lote 21	95%	95%	100%	90%	81%
Lote B	95%	95%	100%	90%	81%
Vásquez 1977	95%	95%	100%	90%	81%

5.2 Análisis del componente biológico.

Debido a que en la metodología de Storie (1970) no se incluye la medición de parámetros biológicos del suelo, en este estudio se analizaron algunas variables biológicas y microbianas que coadyuven a determinar posibles procesos de degradación en los diferentes manejos agronómicos estudiados. En este apartado se incluyen COS, N-total, actividad microbiana estimada como respiración basal, géneros de hongos dominantes, géneros de bacterias dominantes y cuantificación de hongos, bacterias y actinomicetos.

5.2.1 Carbono orgánico.

El carbono orgánico del suelo (COS) se relaciona con la sustentabilidad de los sistemas agrícolas, pues afecta las propiedades del suelo que están relacionadas con el rendimiento sostenido de los cultivos. El COS se relaciona con la cantidad y disponibilidad de nutrientes del suelo, funciona como un amortiguador de la acidez y la alcalinidad, lo que genera valores de pH cercanos a la neutralidad; además el COS participa activamente en la agregación del suelo y la estabilidad mecánica del suelo.

Los contenidos de COS de los distintos manejos evaluados se presentan en el Cuadro 12; los valores varían en un intervalo de 1,56% para el lote con rotación caña – arroz – caña (Lote 21) a 1,93 % en el lote palmar en regeneración natural (Lote B). Estos valores se encuentran en el ámbito de valores medios según Molina y Meléndez (2002).

Los valores hallados en esta investigación fueron mayores a los encontrados en el estudio base realizado por Vásquez (1977), principalmente en el lote palmar en regeneración natural (Lote B), que aumentó de 1,50 a 1,93% luego de 40 años de cobertura vegetal sin remoción.

Los contenidos de N⁻ total fueron similares entre los distintos manejos agronómicos, aunque en el lote palmar en regeneración natural (Lote B) fue mayor (Cuadro 12).

5.2.2 *Respiración Basal.*

Al analizar la tasa de respiración basal en los suelos de los distintos manejos agronómicos se observaron diferencias; así el lote con rotación caña – arroz – caña (Lote 21) presentó la menor tasa de respiración microbiana con 64 mg C-CO₂/kg día⁻¹; posiblemente este valor refleje el efecto negativo del exceso de mecanización y el tiempo de inundación durante los ciclos de arroz ya que según Hinostroza et al, (2021) los suelos anegados tienen por lo general una menor respiración basal debido a que el agua ocupa los espacios porosos y el oxígeno atmosférico no puede penetrar rápidamente. Los otros manejos mostraron valores de respiración microbiana similares, sin diferenciarse del lote palmar en regeneración natural (Lote B). (Cuadro 12)

Cuadro 12. Contenidos de carbono orgánico, nitrógeno total y respiración microbiana del suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10), caña-arroz-caña (Lote 21) y palmar en regeneración natural (Lote B) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica.

Unidad	Variable	Lote 17	Lote 10	Lote 21	Lote B	Vásquez 1977
%	COS	1,72	1,70	1,56	1,93	1,50
	N-total	0,16	0,15	0,14	0,19	-
Relación	C/N	10,51	11,11	10,86	10,14	-
mg C-CO ₂ /kg día	Respiración basal	91,00	81,00	64,00	96,00	-

5.2.3 *Recuento de grupos microbianos*

Los grupos funcionales microbianos conformados principalmente por bacterias y hongos resultan importantes al momento de evaluar la calidad del suelo, pues éstos

responden de manera sensible a las alteraciones causadas por la introducción de agentes xenobióticos, quemas o incendios forestales, actividades como labranza, aplicación de plaguicidas, erosión entre otros (Avellaneda y Torres, 2013; Beltrán y Lizarazo, 2013).

En el presente estudio se hallaron valores de UFC-bacterias/g.suelo de $1,10 \times 10^7$ a $1,50 \times 10^7$ en los suelos de los lotes sin renovación de cepa (Lote 17), rotación caña – caña (Lote 10) y palmar en renovación natural (Lote B). Estas poblaciones son similares a las halladas por Osorio (2009) en mollisoles de Colombia. Sin embargo, el suelo del lote rotación caña – arroz – caña (Lote 21) presentó un valor menor ($0,7$ UFC/g.suelo) en congruencia con el menor valor hallado de respiración basal y que se asocia posiblemente al efecto negativo del periodo de inundación del suelo durante los ciclos de arroz en la rotación, como lo indican Quirós y Ramírez (2006) al estudiar sistemas arroceros bajo riego.

En cuanto a hongos y actinomicetos las poblaciones oscilaron entre $2,54 \times 10^4$ UFC/g.suelo en el lote palmar en renovación natural (Lote B) a $7,0 \times 10^4$ UFC/g.suelo en el lote rotación caña – arroz – caña (Lote 21) para hongos y de 11×10^5 UFC/g.suelo para el Lote 21 a 94×10^5 UFC/g.suelo en el Lote B para actinomicetes, valores similares a los informados por Osorio (2009) en mollisoles en Colombia (Cuadro 13).

Cuadro 13. Recuento de los principales grupos de microorganismos presentes en el suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10), caña-arroz-caña (Lote 21) y palmar en regeneración natural (Lote B) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica

Variable	**Ref.	Lote 17	Lote 10	Lote 21	Lote B
Bacterias (UFC/g.suelo)	$1,2 \times 10^7$	$1,3 \times 10^7$	$1,5 \times 10^7$	$0,7 \times 10^7$	$1,10 \times 10^7$
Actinomicetes (UFC/g.suelo)	30×10^5	14×10^5	53×10^5	11×10^5	94×10^5
Hongos(UFC/g.suelo)	$3,0 \times 10^4$	$4,7 \times 10^4$	$6,5 \times 10^4$	$7,0 \times 10^4$	$2,5 \times 10^4$

** Tomado de Osorio, 2009

Respecto a los géneros de las bacterias dominantes se identificó *Bacillus mycoides* y *Bacillus sp* en los suelos de los distintos manejos agronómicos estudiados.

Por otra parte, los géneros de hongos *Trichoderma sp*, *Penicillium sp*, *Mucor sp* y *Aspergillus sp*, fueron dominantes en los suelos analizados, independientemente del manejo

agronómico implementado (Cuadro 14). Cabe destacar que los géneros de hongos antes mencionados se citan en la literatura como antagonicos ante microorganismos patógenos

Cuadro 14. Géneros de bacterias y hongos dominantes del suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10), caña-arroz-caña (Lote 21) y palmar en regeneración natural (Lote B) de la Finca Experimental UTN, Cañas, Guanacaste.

Variable	Lote 17	Lote 10	Lote 21	Lote B
Géneros de bacterias dominantes	<i>Bacillus mycoides</i> , <i>Bacillus sp</i>	<i>Bacillus mycoides</i> , <i>Bacillus sp</i>	<i>Bacillus mycoides</i> , <i>Bacillus sp</i>	<i>Bacillus mycoides</i> , <i>Bacillus sp</i>
Géneros de hongos dominantes	<i>Trichoderma sp</i> , <i>Penicillium sp</i> , <i>Mucor sp</i> , <i>Aspergillus sp</i>	<i>Trichoderma sp</i> , <i>Penicillium sp</i> , <i>Mucor sp</i> , <i>Rhizopus sp</i> , <i>Aspergillus sp</i>	<i>Trichoderma sp</i> , <i>Mucor sp</i> , <i>Aspergillus sp</i>	<i>Trichoderma</i> , <i>Penicillium</i> , <i>Mucor</i> , <i>Rhizopus</i> , <i>Aspergillus</i>

5.3 Parámetros de diseño y caudales para riego por surcos en los lotes con manejo agronómico diferenciado.

Se determinaron los parámetros y caudales que se deberán aplicar de acuerdo a las condiciones del clima y del cultivo, en los seis meses secos, para cada uno de los lotes en estudio.

5.3.1 Cálculo de la lámina bruta (*L_b*) y de la lámina neta (*L_n*).

Según lo consultado a especialistas en el cultivo de caña de azúcar y de acuerdo con las experiencias del Distrito de Riego Arenal Tempisque, el agotamiento permitido para el cultivo de la caña de azúcar es del 50% y la eficiencia de aplicación y conducción para el riego por surcos es del 45%.

Luego de realizar las consultas pertinentes en cuanto a la profundidad de raíces del cultivo de caña de azúcar en la zona de estudio, se definió una profundidad de que oscila entre los 40 cm hasta los 60 cm.

Cuadro 15. Lámina neta necesaria para el riego por surcos del suelo mollisol para seis meses secos, en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10) y rotación caña-arroz-caña (Lote 21) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica.

Mes	Prof. radicular (mm)	Lámina neta (mm)		
		Lote 17	Lote 10	Lote 21
Diciembre	400	29,3	31,0	34,6
Enero	400	29,3	31,0	34,6
Febrero	500	36,6	38,8	43,2
Marzo	600	43,9	46,5	51,8
Abril	600	43,9	46,5	51,8
Mayo	600	43,9	46,5	51,8

A partir de la información recabada y los análisis de laboratorio realizados se obtuvieron los valores de la lámina neta, para los diferentes meses y las diferentes profundidades de raíces, mostrados en el Cuadro 15, donde se aprecia que para una profundidad de 60 cm, en el Lote 17 es de 43,9 mm, en el Lote 10 es de 46,50 mm y para el Lote 21 la lámina neta a aplicar es de 51,8 mm.

5.3.2 Determinación de las pendientes y sentido del riego.

Las parcelas en estudio cuentan con el sentido de riego establecido por la Universidad Técnica Nacional de acuerdo a su experiencia de más de 30 años. Además, cuentan con un ancho de surco de 1,50 metros.

Cuadro 16. Pendientes de surcos del suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10) rotación caña-arroz-caña (Lote 21) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica.

Lote	Sentido de riego	Pendiente S %	Separación surco W (m)
Lote 17	noreste - suroeste	0,40	1,50
Lote 10	noreste - suroeste	0,40	1,50
Lote 21	oeste - este	0,30	1,50

5.3.3 Cálculo de la frecuencia de riego (Fr).

Según la serie de datos (29 años) de la estación meteorológica San Luis, Cañas (Rojas, 1985), de los meses analizados, el mes que posee la mayor evapotranspiración es en marzo con 5,62 mm/día calculada mediante la ecuación de Priestley – Taylor (Rojas, 1985).

Cuadro 17. Evapotranspiración potencial (Eto), coeficiente de cultivo por etapa (Kc) y evapotranspiración del cultivo (Etc) para los meses comprendidos entre diciembre y mayo en la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica.

Mes	Eto (mm/día)	Kc etapa	Etc (mm/día)
Diciembre	4,18	0,37	1,55
Enero	4,87	0,37	1,80
Febrero	5,28	0,37	1,95
Marzo	5,62	0,62	3,48
Abril	5,55	0,62	3,44
Mayo	4,52	0,62	2,80

Una vez obtenida la frecuencia de riego, se debe redondear al entero más próximo hacia abajo y luego ajustar la lámina neta y la lámina bruta. Estos resultados se muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 18. Frecuencia de riego del suelo mollisol para seis meses secos, en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10), rotación caña-arroz-caña (Lote 21) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica.

Mes	Lote 17			Lote 10			Lote 21		
	Fr ajus. (día)	Ln ajus. (mm)	Lb ajus. (mm)	Fr ajus. (día)	Ln ajus. (mm)	Lb ajus. (mm)	Fr ajus. (día)	Ln ajus. (mm)	Lb ajus. (mm)
Diciembre	18	27,9	61,9	20	30,9	68,8	22	34,0	75,7
Enero	16	28,8	64,0	17	30,6	68,0	19	34,2	76,0
Febrero	18	35,2	78,1	19	37,1	82,5	22	43,0	95,5
Marzo	12	41,8	92,9	13	45,3	100,6	14	48,7	108,3
Abril	12	41,3	91,8	13	44,8	99,5	15	51,6	114,8
Mayo	15	42,0	93,3	16	44,8	99,6	18	50,4	112,0

Para los lotes 17 y 10 se obtienen frecuencias de riego de 10 días y para el lote 21 la frecuencia de riego es de 11 días, dado que la lámina neta a aplicar es mayor para este lote.

Las frecuencias de riego utilizadas en la Finca Experimental UTN se encuentran en el ámbito de 15 a 20 días, o sea, mayores a las requeridas por el suelo en este caso.

5.3.4 Longitud de surco (L).

La longitud de los surcos para los lotes estudiados en la finca UTN se encuentran establecidos. Además, se determinó la longitud del surco teórica en función de la lámina neta y la pendiente del terreno (Anexo I).

Cuadro 19. Longitud de surco establecido y teórico del suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10), rotación caña-arroz-caña (Lote 21) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica.

Lote	Longitud de surco finca (m)	Ln ajustada Mín. (mm)	Pendiente S (%)	Longitud máx. del surco teórica (m)
Lote 17	200.0	61.90	0.40	220.0
Lote 10	110.0	68.00	0.40	230.0
Lote 21	150.0	75.65	0.30	243.0

Como se aprecia en el Cuadro 19, la longitud de surco de finca para los diferentes lotes se encuentra dentro de la longitud máxima de surco teórica.

5.3.5 Caudal máximo no erosivo (Q_{máx}).

Utilizando el cuadro del Anexo I, para las pendientes dadas, se calcularon los caudales máximos no erosivos para cada uno de los lotes.

Cuadro 20. Caudal máximo no erosivo del suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (LOTE 17), caña-caña (LOTE 10), rotación caña-arroz-caña (LOTE 21) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica.

Lote	Q _{máx} (l/s)	Q _{máx} (l/min)
Lote 17	1,76	105,60
Lote 10	1,76	105,60
Lote 21	2,27	136,20

En el Cuadro 10 se muestran los caudales máximos no erosivos para cada lote en estudio, el lote 21 requiere la aplicación de un caudal de 136.20 l/min, para los lotes 17 y 10 será de 105 l/min.

5.3.6 Caudal de infiltración (Q_{inf}).

El caudal de infiltración o caudal de la segunda etapa de riego se calculó como producto de la velocidad promedio, la separación de surcos, longitud del surco y una constante de 0,167. Para el cálculo de la velocidad de infiltración promedio, se debe multiplicar la infiltración básica por un factor de 1,33 para textura de suelos de medias a moderadas gruesas.

Cuadro 21. Caudal de infiltración del suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (Lote 17), caña-caña (Lote 10), rotación caña-arroz-caña (Lote 21) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica.

Parcela	Infiltración Ib (mm/h)	Velocidad Vip (cm/h)	Separación surco W (m)	Longitud de surco (m)	Q_{inf} (l/min)
Lote 17	5,70	0,76	1,50	200,00	37,98
Lote 10	5,45	0,72	1,50	110,00	19,97
Lote 21	4,79	0,64	1,50	150,00	23,94

Como se aprecia en el cuadro anterior, el Lote 17 ocupa el mayor caudal de infiltración, siendo este de 37,98 l/min ya que es el surco con mayor longitud, para el Lote 10 el caudal de infiltración es de 19,97 l/min y para el Lote 21 es de 23,94 l/min.

En la Finca Experimental UTN se manejan caudales para riego del cultivo de caña de azúcar en el ámbito de 120 a 150 l/min, caudales mayores a los requeridos en estos suelos, según esta investigación. Inclusive son caudales mayores a los caudales máximos no erosivos recomendados por Villalobos (2008), valores que se muestran el Cuadro 20.

5.3.7 Tiempo de infiltración (T_i), tiempo de avance (T_a) y tiempo total de riego (T_t).

En el siguiente cuadro se observa que el lote rotación caña – caña (Lote 21) necesita mayor tiempo de riego, debido a que posee una tasa de infiltración más baja que los otros

lotes. Además, se muestra los tiempos totales de riego, que aumentan significativamente a partir del mes de febrero.

Cuadro 22. Tiempo de infiltración (Ti), tiempo de avance (Ta) y tiempo total de riego (Tt) del suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (LOTE 17), caña-caña (LOTE 10) rotación caña-arroz-caña (LOTE 21) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica.

Mes	Lote 17			Lote 10			Lote 21		
	Ti (h)	Ta (h)	Tt (h)	Ti (h)	Ta (h)	Tt (h)	Ti (h)	Ta (h)	Tt (h)
Diciembre	8,1	2,0	11,0	9,6	2,4	12,0	11,8	3,0	14,8
Enero	8,4	2,1	10,5	9,4	2,4	11,8	11,9	3,0	14,9
Febrero	10,3	2,6	12,9	11,5	2,9	14,4	14,9	3,7	18,6
Marzo	12,2	3,1	15,3	14,0	3,5	17,5	16,9	4,2	21,1
Abril	12,1	3,0	15,1	13,8	3,5	17,3	17,9	4,5	22,4
Mayo	12,3	3,1	15,4	13,8	3,5	17,3	17,5	4,4	21,9

5.3.8 *Volumen total de riego por surco gastado según estudio y según el caudal aplicado por la finca.*

Con los datos de los Cuadros 20, 21 y 22, se determina la cantidad de riegos que se deben aplicar por mes y se calcula el volumen total consumido por surco para cada uno de los lotes (Cuadro 23).

En la Finca Experimental UTN suministran un caudal en el ámbito de 120 a 150 l/min (promedio de 130 l/min) para regar el cultivo de caña de azúcar con una duración de 24 horas y con una frecuencia de riego de 15 días. Con esta información se determina la cantidad de riegos que se aplican por mes y se calcula el volumen gastado por surco para cada uno de los lotes.

Cuadro 23. Número de riegos (N°) y volumen total de agua (Vt) consumida por surco según el estudio realizado y aplicación de la finca en el suelo mollisol en los lotes caña sin renovación de cepa (LOTE 17), caña-caña (LOTE 10) rotación caña-arroz-caña (LOTE 21) de la Finca Experimental UTN, Sede Guanacaste, Cañas, Costa Rica.

Mes	Lote 17				Lote 10				Lote 21			
	Estudio		Finca		Estudio		Finca		Estudio		Finca	
	N° riegos surco	Vt surco (m ³)	N° riegos surco	Vt surco (m ³)	N° Riegos	Vt surco (m ³)	N° Riegos	Vt surco (m ³)	N° Riegos	Vt surco (m ³)	N° Riegos	Vt surco (m ³)
Diciembre	2,0	62,6	2,0	374,4	2,0	53,4	2,0	374,4	2,0	82,1	2,0	374,4
Enero	2,0	64,9	2,0	374,4	2,0	52,3	2,0	374,4	2,0	82,8	2,0	374,4
Febrero	2,0	79,6	2,0	374,4	2,0	64,0	2,0	374,4	1,0	51,8	2,0	374,4
Marzo	3,0	141,4	2,0	374,4	2,0	77,9	2,0	374,4	3,0	176,4	2,0	374,4
Abril	3,0	140,2	2,0	374,4	3,0	115,2	2,0	374,4	2,0	124,6	2,0	374,4
Mayo	2,0	95,0	2,0	374,4	2,0	76,8	2,0	374,4	2,0	121,8	2,0	374,4
Total en 6 meses	14,0	583,7	12,0	2246,4	13,0	439,6	12,0	2246,4	12,0	639,5	12,0	2246,4

Del cuadro anterior se aprecia que los meses donde se requiere mayor volumen de agua son marzo y abril según la investigación. La Finca Experimental de la UTN utiliza el mismo gasto para todos los meses (374,4 m³).

A pesar de que los cálculos de esta investigación nos muestran que se necesitan mayor número de riegos para cada lote, el gasto de agua en m³ es mucho menor al generado por la Finca.

6 Conclusiones y Recomendaciones.

1. Los suelos mollisoles (Fluventic Haplustolls) en los manejos de caña permanente (Lote 17) y rotación caña-arroz-caña (Lote 21) recibieron igual calificación para el Índice de Calidad de Storie (I. C. S.) a saber 81%, que no se diferenció del I.C.S asignado al suelo Fluventic Haplustolls del área en regeneración natural y que no se cultiva con caña de azúcar (Lote B), ni tampoco del I.C.S establecido para estos suelos con base en el estudio

cartográfico inicial hecho por Vásquez (1977) y que fue previo al cultivo con caña de azúcar.

El suelo (F. Haplustoll) del lote con manejo de rotación caña-caña (Lote 10) recibió un I.C.S menor, del orden de 73%, debido al “drenaje regular” (estancamiento del agua sobre la superficie al menos por 2 días), que disminuyó la valoración del Factor X y que está asociado a un relieve plano que afecta la gradiente hidráulica para el escurrimiento y a que esta lote carece de drenes superficiales para evacuar las aguas de escorrentías superficiales. Se recomienda para este lote la implementación de una red de drenaje superficial.

2. La determinación de los Índices de Calidad de Storie tiene un propósito claro para determinar la capacidad productiva de una serie de suelos, pero las clases definidas para los parámetros en los cuatro factores (A, B, C y X) son muy amplios para valorar efectos particulares de prácticas de cultivo sobre el suelo a corto y mediano plazo, estos I.C.S como tales tienen poca sensibilidad para valorar cambios en las propiedades del suelo, que podrían conducir a procesos degradativos. Sin embargo, el análisis de los parámetros correspondientes sí ofrecen una alternativa válida para evaluar los efectos en forma sistemática, del uso y la forma de uso de los suelos. Lo anterior, aumentaría el potencial de diagnóstico si las evaluaciones se repitiesen en el tiempo a intervalos definidos con el fin de encontrar cambios degradativos o regenerativos en estos suelos.

En el presente caso, cabe destacar que se determinó en campo un proceso de erosión laminar en los suelos cultivados con caña de azúcar, independientemente del manejo agronómico implementado, que se demostró también al hallarse una disminución del grosor del horizonte Ap con respecto del lote en regeneración natural y del estudio inicial de Vásquez (1977).

Esta erosión está asociada en gran medida al empleo de dosis de riego sobrestimadas, por lo cual el diseño basado en la medición de las propiedades del suelo y características del cultivo, y no en valores de supuestos empíricos es una tarea prioritaria.

Por otra parte, en el suelo con manejo de rotación caña-arroz-caña (Lote 21) se percibió una densificación del mismo, expresada como mayor densidad aparente, menor porosidad y

menor tasa de infiltración básica. Probablemente esta condición es causada por las prácticas de mecanización durante los ciclos de arroz. La rotación caña –arroz fue implementada para suelos vertisoles, donde ha sido exitosa, pero no es adecuada para suelos molisoles con excelentes características químicas, pero con menor resistencia mecánica para labores de labranza. Barrantes y Molina (2007) informan de resultados similares en suelos inceptisoles en sistemas de rotación caña-arroz.

Se recomienda realizar en el lote de rotación caña – arroz – caña (Lote 10) estudios de resistencia a la penetración a diferentes profundidades para corroborar la necesidad de acciones correctivas. Así mismo valorar con base en la información hallada en el presente estudio, la implantación de alternativas para el ciclo del arroz de menor impacto mecánico o la búsqueda de prácticas que sustituyan los efectos benéficos del ciclo con arroz, tales como abonos orgánicos, abonos verdes, rotación con leguminosas, conservación de aguas y labranza mínima.

3. El cultivo de caña de azúcar mejoró algunas características del suelo, independientemente del manejo implementado, en particular la pendiente, pues las labores de adecuación parcelaria disminuyeron la misma a valores menores al 1%. Otro aspecto que mejoró es la oferta de nutrimentos, que aumentó posiblemente debido a efecto de la fertilización.

Cabe señalar que no se determinaron variaciones en la acidez del suelo, ni en el contenido de sales de los suelos en ninguno de los manejos evaluados.

4. En cuanto a los parámetros biológicos, las poblaciones de bacterias, hongos y actinomicetos fueron similares en los suelos con manejo de cepas permanente (Lote 17), rotación caña – caña (Lote 10) y en el palmar en regeneración natural (Lote B). Sin embargo, el suelo con rotación caña-arroz-caña (Lote 21) mostró poblaciones menores y una menor tasa de respiración basal, lo que es congruente con la mayor densificación del suelo observada y con los periodos de aniego durante la rotación con arroz.

Los géneros de bacterias y hongos identificados corresponden a organismos reconocidos como antagonistas ante patógenos.

Por otra parte, los contenidos de carbono orgánico de los suelos (COS) fueron medios (<3%) independientemente del manejo implementado y no se diferenciaron del valor promedio hallado por Vásquez (1977) en su estudio inicial. Debe señalarse que el contenido de COS en el suelo del área en regeneración natural fue ligeramente superior; probablemente el bajo aporte de materia vegetal de la palma real y la baja calidad de la misma hayan influido para que el contenido de COS en ese lote no haya sido mayor a lo largo de 40 años de cobertura continua.

Se recomienda la implementación de prácticas de incorporación de materia orgánica, bien sea *in situ* (rotación con leguminosas) o importada (aplicaciones de compostaje), pues la resiliencia del suelo ante procesos degradativos, en particular la estabilidad mecánica, está fuertemente ligada a ésta.

También se recomienda la incorporación de índices biológicos, como un factor adicional a la metodología de cálculo de los Índices de Calidad según Storie, con la finalidad de mejorar la sensibilidad de los mismos

5. El diseño de riego realizado arrojó valores de caudal menores a los efectuados en la finca para los lotes estudiados, así como intervalos de riego menores. Estos resultados corroboran la aplicación de sobrerriegos, que están asociados a los procesos erosivos observados.

Se recomienda poner en práctica el diseño de riego calculado con los valores de evapotranspiración potencial y los coeficiente de cultivo tal y como se presentaron en los resultados en la página 50, para realizar los ajustes de campo necesarios y hacer un mejor uso del recurso hídrico, con una menor pérdida de suelo.

7 Bibliografía

Abecasis, C. (2015). Un nuevo paradigma: El suelo visto como un organismo vivo. Sociedad Rural de Pergamino - Pergamino - Buenos Aires - Argentina XXIII Jornadas Ganaderas de Pergamino.

Acton, D. F.; Gregorich, L.J. (1995). Understanding soil health. pp. 5-10. In: D. F. Acton and L. J. Gregorich (eds.). The health of our soils: Toward sustainable agriculture in Canada. Centre for Land and Biological Resources Research. Ottawa, Canada.

Alfaro, A. (2005). Reconocimiento hidrogeológico para la ubicación de un pozo perforado en el Colegio Universitario para el Riego y Desarrollo del Trópico Seco. Servicio Nacional de Aguas Subterráneas Riego y Avenamiento. San José, Costa Rica. 12p. (mimeografiado)

An, S; Mentler, A; Mayer, H; Blum, W.E. (2010). Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China.

Araya, J. (2001). Análisis de las explotaciones de caña de azúcar. Informe final de práctica dirigida. Universidad Estatal a Distancia. San José.

Avellaneda, L; Torres, E. (2013). Biodiversidad de grupos funcionales de microorganismos asociados a suelos bajo cultivo de papa, ganadería y páramo en el Parque Nacional Natural de Los Nevados, Colombia. *Biota Colombiana*, 16 (1), 78-87.

Bautista, C.A.; Etchevers, B.; Del Castillo, R.F; Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 13: 90-97.

Beltrán, M.; Lizarazo, L. (2013). Grupos funcionales de microorganismos en suelos de páramo perturbados por incendios forestales. *Revista de Ciencias*, 17 (2), 121-136

Benites, J. (2015). Guía de Campo, Evaluación Visual del Suelo. Consultor en manejo de tierras y aguas, agricultura de conservación y fertilidad de suelos.

Bertsch F.; Alvarado, A.; Henríquez, C.; Mata, R. (2000). Properties, geographic distribution, and management of major soil orders of Costa Rica. In: Ch. A. S. Hall (ed.) Quantifying sustainable development, the future of tropical economies. Academic. p. 265-294.

Bertsch, F. (1987). Manual para interpretar la fertilidad de los suelos en Costa Rica. 2° ed. Editorial Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 78 p.

Bezdicsek, D.F.; Papendick, R.I.; Lal, R. (1996). Methods for assessing soil quality. SSSA Special publication number 49. pg. 1-8.

Blake, G.R; Hartge, K.H. (1986). Bulk Density. In: A Klute (ed). Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. Pp. 363- 375. Am. Soc. Agron. and Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisconsin, USA.

Chaves, M.A. (2017). Taxonomía de los suelos sembrados con caña de azúcar en Costa Rica: Ordenes y Subórdenes presentes. Congreso de Técnicos Azucareros de Centroamérica (ATACA), 21 y Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Honduras (ATAHON), 20, San Pedro Sula, Honduras, 2017. Memoria. San Pedro Sula, Honduras, ATACA/ATAHON, agosto 22 al 25, Centro de Convenciones Copantl. 14 p.

Chaves, M. Et al. (2017). Tipos de suelo y producción de caña de azúcar en Costa Rica: Primera aproximación taxonómica. Congreso Nacional de Suelos, 9, San José, Costa Rica, 2017. Memorias. San José, Costa Rica, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS), octubre 25 al 27, Hotel Crowne Plaza San José Corobici.

Chenu, C.; Bissonnais, L.; Arrouays, D. (2000). Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. Soil Sci. Soc. Am. J. 64: 1479-1486

Cortes, G. (2013). Degradación de suelos agrícolas y el SIRSD-S, Oficina de estudios de política Agraria. Ministerio de Agricultura de Chile. Contacto www.odepa.gob.cl

Cosentino, D; Chenu, C.; Bissonnais, L. (2006). Aggregate stability and microbial community dynamics under drying-wetting cycles in a silt loam soil. *Soil Biology and Biochemistry* 38: 2053-2062.

Delgado, R; Salas, A. (2006). Consideraciones para el desarrollo de un sistema integral de evaluación y manejo de la fertilidad del suelo y aplicación de fertilizantes para una agricultura sustentable en venezuela. *Agronomía Trop.*, vol.56, n.3, pp. 289-323. ISSN 0002-192X.

Desir, G.; Sirvent, J. (2001). Efecto de la adición de materia orgánica fluida en la estabilidad de los agregados del suelo (Monegros, Depresión del Ebro). *Rev. C. & G.*, 16 (1-4), 21-32.

Dexter, A.; Richard, G.; Arrouays, D.; Czyz, E.; Jolivet, C.; Duval, O. (2008). Complexed organic matter controls soil physical properties. *Geoderma* 144: 620–627.

Doran, J.W.; Parkin T.B. (1996). Methods for assessing soil quality. *Quantitative*

Doran, J.W.; Parkin T.B. (1994). Defining and assessing soil quality. In: JW Doran, DC Coleman, DF Bezdicek, and BA Stewart (eds.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. SSSA Spec. Pub. No. 35, Soil Sci. Soc. Am., Am. Soc. Argon., Madison, WI. p. 3-21.

FAO, (1994) *Erosión de suelos en América Latina*. Suelos y Aguas. p. 33-52.

Ferreras, L.; et al (2009). Parámetros químicos y biológicos como indicadores de calidad del suelo en diferentes manejos. *Ciencia del Suelo*, Vol. 27 Issue 1, Pg. 103-114, 12p indicators of soil quality: a minimum data set. Pg. 25-35.

Ferreras, L.; Toresani, S.; Bonel, B.; Fernandez, E.; Bacigaluppo, S.; Faggioli, V.; Beltran, C. (2009). Parámetros químicos y biológicos como indicadores de calidad del suelo en diferentes manejos. *Ciencia del Suelo*, Vol. 27 Issue 1, Pg. 103-114, 12p indicators of soil quality: a minimum data set. Pg. 25-35.

Flores, L. (2010). Manual de Procedimientos Analíticos Laboratorio de Física de Suelos Instituto de Geología. Departamento de Edafología. Universidad Nacional Autónoma de México.

Gelasio, S. et al. (2012). Degradación físico-química de suelos agrícolas en San Pedro Lagunillas, Nayarit. Unidad Académica de Agricultura. Universidad Autónoma de Nayarit. Carretera Tepic-Compostela Km. 9, 63780 Xalisco, Nayarit. Revista; Tropica and subtropical Agroecosystems, 15(2012) pp 323-328.

Hamza, M.A.; Anderson, W.K. (2005). Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. Soil Till. Res. 82: 121-145.

Hernández, A; Bojórquez, J.I.; Morell, F.; Cabrera, A; Ascanio, M.O.; García, J.D.; et al. (2010). Fundamentos de la estructura de suelos tropicales. Primera Edición. Nayarit, México: Universidad Autónoma de Nayarit; 2010. 80 p.

Hernández, A.; Morales, M.; Cabrera, A.; Ascanio, M.O.; Borges, Y.; Vargas, D.; et al. (2013). Degradación de los suelos Ferralíticos Rojos Lixiviados y sus indicadores de la Llanura Roja de La Habana. Cultivos Tropicales.

Instituto Nacional de Innovaciones y Transferencia en Tecnología Agropecuarias (INTA-COSTA RICA). (2015). Suelos de Costa Rica Orden Mollisol. Boletín técnico N° 6. Departamento de Transferencia e Información Tecnológica-INTA. San José, Costa Rica.

Karlen, D.; Eash, N.; Unger, P. (1992). Soil and Crop Management Effects on Soil Quality Indicators. En American Journal of Alternative Agriculture. Vol. 7 p. 48-56.

Kay, B.D. (1998). Soil structure and organic carbon: A review.p. 169-197. In: R.Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett, and B.A.. Stewart (ed.) Soil processes and the carbon cycle. CRC Press, Boca Raton.

Kay, B.D. (1990). Rates of change of soil structure under differentcropping systems. Adv. Soil Science 12: 1-52

Lal, R. (1998). Métodos y normas para evaluar el uso sostenible de los recursos suelo y agua en el trópico. Pg. 14.

Linn, D. M.; y J. W. Doran. (1984b). Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Science Society of America Journal* 48: 1257-1272

Piscitelli, M. (2015). Degradación de suelos. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Profesora Asociada de Conservación y Manejo de Suelos, Facultad de Agronomía, UNICEN. Buenos Aires. Argentina

Molina, E. y Meléndez, G. (2002). Tabla de interpretación de análisis de suelos. Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. Mimeo.

Morales, M. (1996). Efecto de los microorganismos sobre la estabilidad mecánica del suelo. Escuela de Fitotecnia, Facultad de Agronomía, Universidad de Costa Rica. X Congreso Nacional Agronómico / II Congreso de Suelos 1996.

Nannipieri, P.; Grego, S; Ceccanti, B. (1990). Ecological significance of the biological activity in soil. pp. 293-355. In: J. M. Bollag and G. Stotzky (eds.) *Soil Biochemistry*, Volume 6. Marcel Dekker. New York, NY, USA.

Ortega, S; y Acevedo, C. (1999). Programación del riego. Comisión Nacional de Riego, Universidad de Talca. Chile. 15p

Pablos, P.; León, M. de; Cortegaza, P. L.; Osorio, N. y Villegas, R. (2007). Afectación de la materia orgánica del suelo bajo diferentes condiciones de manejo. Evento por el 60 Aniversario de la EPICA de Jovellanos. Varadero-Matanzas, ISBN 1021-6527.

Paolini, J.E. (2017). Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos. *Terra Latinoamericana* 36: 13-22. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i1.257>

Parr, J., Papendick, R., Hornick, S. y Meyer, R. (1992). Soil quality: Attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. *American Journal of Alternative Agriculture*. Vol.7. p.5-11.

Pell, M., Stenström, J; y Granhall, U. (2006). Soil respiration. pp. 117-126. In: J. Bloem, D. W. Hopking, and A. Benedetti (eds.). *Microbiological methods for assessing soil quality*. CAB International. Wallingford, UK.

Peralta (2012). *Propuesta Metodológica Para Determinar La Calidad Del Suelo Sembrado En Caña De Azúcar En El Ingenio Manuelita*. Trabajo de grado para optar al título de Magister en ciencias Agrarias. Universidad Nacional De Colombia Facultad De Ciencias Agropecuarias, Coordinación General De Postgrados Palmira

Piscitelli, M. (2015). *Degradación de suelos; El suelo, un recurso natural y un medio dinámico*. Con los pies sobre la tierra, año internacional de los suelos, Universidad del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

Ramírez, (1997). *Propiedades Físicas Químicas y Biológicas de los Suelos*. Convenio FENALCE - SENA – SAC. Santa Fe de Bogotá, Colombia.

Rattan, L. (1998). *Métodos y normas para evaluar el uso sostenible de los recursos suelo y agua en el trópico*. Pg. 14.

Reynolds, W.D; Bowman, B.T.; Drury, C.F.; Tan, C.S.; Lu, X. (2002). Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma* 110: 131–146.

Rojas, O.E. (1985). *Estudio agroclimático de Costa Rica*. San José: IICA Publicación miscelánea.

Singer, M.J. y Ewing, S. (2000). Soil Quality. En *Handbook of Soil Science*. Chapter 11 (ed. Sumner, M. E.), 271-298, CRC Press, Boca Raton, Florida

Smith, L.J., y Papendick, R.I. (1993). Soil organic matter dynamics and crop residue management. p. 65–94. In: Blaine Metting (Ed). *Soil microbiol ecology*. Marcel Dekker. New York.

Steiner, K.G. (1996). Causes of soil Degradation and Development Approaches to Sustainable Soil Management. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. Margraf Verlag, Weikersheim, Germany.

Taalab, K.P.; Corstanje, R.; Creamer, R y Whelan M.J. (2013). Modelling soil bulk density at the landscape scale and its contributions to C stock uncertainty. *Biogeosci.* 10: 4691-4704

Tate, R.L. (1995). Soil microbiology. John Wiley & Sons, New York.

USDA. (1999). Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. Departamento de Agricultura de los EE.UU. (USDA's TARGET Center), al teléfono (202) 720-2600.

USDA. (2010). Keys to Soil Taxonomy, Eleventh Edition. Pg. 28-30.

Valerio, C. (1998). Anotaciones sobre Historia Natural de Costa Rica. EUNED. San José, Costa Rica. 152p.

Wilson, M.G.; Sasal, M.C.; Caviglia O.P. (2013) Critical bulk density for a Mollisol and a Vertisol using least limiting water range: Effect on early wheat growth. *Geoderma* 192: 354–361.

Zadorova, T.; Jakšik, O.; Kodešová, R; Penížek, V. (2011). Influence of terrain attributes and soil properties on soil aggregate stability. *Soil Water Research*.

8 Anexos

8.1 ANEXO 1. Longitud máxima de surcos (m) y caudal máximo a aplicar según pendiente.

S ↓ %	Q ↓ l.p.s	TEXTURA																							
		Finas					Mod finas			Medias					Mod gruesas			Gruesas					Muy gruesas		
		Lámina (cm)					Lámina (cm)			Lámina (cm)					Lámina (cm)			Lámina (cm)					Lámina (cm)		
		5	7,5	10	15	20	5	7,5	10	5	7,5	10	15	20	5	7,5	10	5	7,5	10	15	20	5	7,5	10
0,25	2,52	320	388	457	535	650	289	350	396	251	297	350	440	500	198	243	281	152	182	213	265	300	68	83	99
0,50	1,26	220	266	304	380	450	198	243	274	167	205	236	300	350	137	167	190	99	121	144	180	200	45	53	65
0,75	0,84	175	213	243	305	350	152	182	213	129	160	190	235	280	106	129	152	83	99	114	145	170	38	45	53
1,00	0,63	144	182	205	260	300	129	160	182	114	137	160	200	230	91	106	129	68	83	99	120	150	30	38	45
1,50	0,42	114	144	167	215	250	106	129	152	91	114	129	160	200	76	91	106	53	68	76	100	120	-	30	38
2,00	0,32	99	121	144	185	200	91	106	121	76	91	106	140	160	60	76	91	45	60	68	85	100	-	30	30
2,50	0,25	91	106	129	160	-	76	91	114	68	83	99	120	-	53	68	76	38	53	60	70	-	-	-	30
3,00	0,21	83	99	114	145	-	68	83	106	60	76	91	110	-	45	60	68	38	45	53	65	-	-	-	-
4,00	0,16	68	83	99	120	-	60	76	91	53	60	76	90	-	45	53	60	30	38	45	60	-	-	-	-
5,00	0,13	60	76	83	105	-	53	68	76	45	53	68	85	-	38	45	53	30	30	38	50	-	-	-	-

S = Pendiente Q = Caudal Mod = Moderadamente

Adaptado de: Planeación y diseño de Riego. (El buen uso y manejo del agua de riego). Por Idelfonso de la Peña. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Memorandum Técnico N°381. México, D.T. 1978.

8.2 ANEXO 2. Carta para la calificación de los suelos

Índice de Storie para la calificación de los suelos Enero de 1964

CARTA PARA LA CALIFICACIÓN DE LOS SUELOS (Calificación de los suelos por el Índice de Storie = Factor A x Factor B x Factor C x Factor X)

FACTOR A: CALIFICACIÓN POR EL CARÁCTER DEL PERFIL FÍSICO		
Grupo de perfiles		
I	Suelos en delta aluvial llanura de inundación y otros depósitos secundarios recientes, con perfil no desarrollado	100
	Fases poco profundas sobre material sobre material consolidado; 60 cm de profundidad	50-60
	Fases poco profundas; 90 cm de profundidad	70
	Subsuelo con cantidad extrema de grava	80-95
	Subsuelo de arcilla estratificado	80-95
II	Suelos en delta aluvial llanura de inundación y otros depósitos secundarios recientes, con perfil ligeramente desarrollado.	95-100
	Fases poco profundas; 60 cm de profundidad	50-60
III	Suelos de alta aluvial más antiguo, llanura de inundación o terraza con perfil modernamente desarrollo (subsuelo moderadamente denso)	80-95
	Fases poco profundas en material consolidado; 60 cm profundidad	40-60
	Fases poco profundas en material consolidado; 90 cm profundidad	60-70
IV	Suelos en llanuras o terrazas más antiguas con perfil fuerte desarrollado (subsuelo denso de arcilla)	40-80
V	Suelos en llanuras o terrazas más antiguas con subsuelos de capas duras:	
	a menos de 30 cm	5-20
	a 30-60 cm	20-30
	a 60-90 cm	30-40
	a 90-120 cm	40-50
VI	a 120-180 cm	50-80
	Suelos en terrazas más antiguas con subsuelo denso de arcilla sobre material moderadamente consolidado o bien consolidado	40-80
VII	Suelos en áreas de tierras altas sobre lecho de roca ígnea dura, con subsuelo ligera a moderadamente desarrollado.	
	a menos de 30 cm	10-30
	a 30-60 cm	30-50
	a 60-90 cm	50-70
	a 90-120 cm	70-80
VIIc	a 120-180 cm	80-100
	Suelos en áreas de tierras altas sobre lecho de roca ígnea dura, con fuerte acumulación de arcilla en el subsuelo	

	a 30-60 cm	20-40
	a 60-90 cm	40-60
	a 90-120 cm	60-70
	a 120-180 cm	70-90
VIII	Suelos en áreas de tierras altas sobre roca sedimentaria dura, ligero a moderado desarrollo del subsuelo	
	a menos de 30 cm	oct-30
	a 30-60 cm	30-50
	a 60-90 cm	50-70
	a 90-120 cm	70-80
	a 120-180 cm	80-100
VIIIc	Suelos en áreas de tierras altas sobre lecho de roca sedimentaria dura, con fuerte acumulación de arcilla en el subsuelo	
	a 30-60 cm	20-40
	a 60-90 cm	40-60
	a 90-120 cm	60-70
	a 120-180 cm	70-85
IX	Suelos en áreas de tierras altas sobre material flojamente consolidado poco a moderado desarrollo del subsuelo	
	a menos de 30 cm	20-40
	a 30-60 cm	40-60
	a 60-90 cm	60-80
	a 90-120 cm	80-90
	a 120-180 cm	90-100
IXc	Suelos de áreas de tierra alta sobre material flojamente consolidado, con fuerte acumulación de arcilla en el suelo	
	a 30-60 cm	20-35
	a 60-90 cm	35-55
	a 90-120 cm	55-70
	a 120-180 cm	70-85
FACTOR B: POR TEXTURA DE LA SUPERFICIE.		
Textura media		100
	Migajón arenoso fino	100
	Migajón	100
	Migajón limoso	95
	Migajón arenoso	95
	Migajón arcilloso limoso	95
	Migajón arcilloso calcáreo	95
	Migajón arcilloso limoso	90
	Migajón arcilloso	85-90
	Migajón arenoso grueso	90
Textura pesada o fina		
	Arcilla limosa calcárea	70-90

	Arcilla calcárea	70-80
	Arcilla luminosa	60-70
	Arcilla	50-70
Textura ligera o gruesa		
	Arena de migajón (gredosa)	80
	Arena muy fina	80
	Arena fina	65
	Arena	60
	Arena gruesa	30-60
Grava o Guijarros		
	Migajón arenoso fino con grava	70
	Migajón con grava	70
	Migajón limoso con grava	70
	Migajón arenoso con grava	65
	Migajón arcilloso con grava	55-60
	Arcilla con grava	35-55
	Arena con grava	20-30
Pedregoso		
	Migajón arenoso fino pedregoso	70
	Migajón pedregoso	70
	Migajón limoso pedregoso	70
	Migajón arenoso pedregoso	65
	Migajón arcilloso pedregoso	60-70
	Arcilla pedregosa	35-55
	Arena pedregosa	10-40
FACTOR C: CALIFICACION POR LA PENDIENTE.		
A	Casi a nivel (0-2%)	100
AA	Ligeramente ondulada (1-2%)	95-100
B	Ligeramente pendiente (3-8%)	95-100
BB	Ondulada (3-8%)	85-100
C	Pendiente moderada (9-15%)	80-95
CC	Quebrada (9-15%)	80-95
D	Fuertemente pendiente (16-30%)	70-80
DD	Lomerío (16-30%)	70-80
E	Colgada (30-45%)	30-50
F	Muy colgada (más de 45%)	5-30
FACTOR X: CALIFICACION POR CONDICIONES DISTINTAS DE LAS INCLUIDAS EN LOS FACTORES A, B ,C		
Drenaje		
	Bien drenado	100
	Drenaje regular	80-90
	Moderadamente estancado	40-60
	Fuertemente estancado	10-40
	Inundación	20-80

Salino, álcali; condiciones toxicas		
	Libre	100
	Ligeramente afectado	60-95
	moderadamente afectado	30-60
	moderada a fuertemente afectado	15-30
	Fuertemente afectado	5-15
Nutrientes		
	Bueno	100
	Regular	95-100
	Malo (bajo)	80-95
	Muy malo	60-80
Acidez		
	Según el grado	80-95
Erosión		
	Ninguna muy ligera	100
	Depósito detrimental	75-95
	Erosión laminar modera	80-95
	Algunas Cárcavas poco Profundas	70-90
	Erosión laminar modera con cárcavas poco profundas	60-80
	Cárcavas profundas	10-70
	Erosión Laminar modera con cárcavas profundas	10-60
	Erosión laminar fuerte	50-80
	Erosión laminar fuerte con cárcavas poco profundas	40-50
	Erosión laminar fuerte con cárcavas profundas	10-40
	Erosión muy fuerte	10-40
	Erosión eólica moderada	80-95
	Erosión eólica fuerte	30-80
Microrrelieve		
	liso	100
	zanjones	60-95
	tumbos	60-95
	montículos bajos	80-95
	montículos altos	20-60
	dunas	10-40