



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS VERACRUZ

POSGRADO EN AGROECOSISTEMAS TROPICALES

EFICIENCIA DEL FERTIRRIEGO DE BAJA PRESIÓN Y MULTICOMPUERTA EN CAÑA DE AZÚCAR

JASIEL VALDIVIA SANCHEZ

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

DOCTOR EN CIENCIAS

TEPETATES, MANLIO FABIO ALTAMIRANO, VERACRUZ, MÉXICO

2023



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesis titulada: **Eficiencia del fertirriego de baja presión y multicompuerta en caña de azúcar** realizada por el estudiante: **Jasiel Valdivia Sánchez** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS

AGROECOSISTEMAS TROPICALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:


DR. JUAN PABLO MARTÍNEZ DÁVILA

ASESOR:


DR. ARTURO PÉREZ VÁZQUEZ

ASESORA:


DRA. MARIA DEL REFUGIO CASTAÑEDA CHÁVEZ

ASESOR:


DR. EUGENIO CARRILLO ÁVILA

ASESOR:


DR. CATALINO JORGE LÓPEZ COLLADO

Tepetates, Manlio Fabio Altamirano, Veracruz, México, marzo de 2023

EFICIENCIA DEL FERTIRRIEGO DE BAJA PRESIÓN Y MULTICOMPUERTA EN CAÑA DE AZÚCAR

Jasiel Valdivia Sánchez, Dr.
Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, 2023

RESUMEN

El fertirriego es una técnica que permite mejorar el aprovechamiento del riego y la fertilización en el cultivo de caña de azúcar. Puede ser implementado en sistemas de riego de baja presión y multicompuerta. El objetivo fue definir la combinación de los factores: duración de la aplicación del fertirriego y dosis de nitrógeno fertilizante que den como resultado los mayores índices de eficiencia del fertirriego y producción por unidad de superficie, así como la relación entre estas dos variables, en agroecosistemas con caña de azúcar bajo sistemas de riego de baja presión y multicompuerta en Los Ídolos, municipio de Actopan, Veracruz. En un experimento factorial 2^2 se evaluaron los factores dosis de nitrógeno en fertirriego (80.5 y 161 kg N ha⁻¹) más 100 kg N de fertilización base, y duración de la inyección de fertilizantes durante el fertirriego (50 y 100 minutos) y se adicionó con un tratamiento testigo que consistió en la fertilización convencional 261 kg N en dos aplicaciones. Las variables respuesta fueron uniformidad de la distribución en el cuarto más bajo ($UD_{1/4}$), coeficiente de distribución de Christiansen (CUC) en nitrógeno en el suelo después del fertirriego, producción por unidad de superficie, huella hídrica y eficiencia de absorción de nitrógeno. Los resultados indican que no existe diferencia significativa (Duncan, alfa = 0.05) en los valores de $UD_{1/4}$ y CUC entre los tratamientos. La huella hídrica tiende a ser menor en los tratamientos donde la dosis de nitrógeno es menor y el tiempo de fertirriego más prolongado. La producción por unidad de superficie de caña de azúcar se incrementa significativamente cuando el tiempo de duración de fertirriego pasa de 50 a 100 minutos. La dosis de nitrógeno no tuvo efecto significativo. Se concluye que dosis reducidas de nitrógeno aplicado en fertirriego con duración de 100 minutos eleva los rendimientos, comparado con la fertilización convencional de 261 kg N ha⁻¹. Con esta información se podrán hacer recomendaciones en la implementación del fertirriego en caña de azúcar con riego de baja presión y multicompuerta.

Palabras clave: fertirriego en surcos, riego de baja presión, multicompuerta, simulación, Veracruz.

EFFICIENCY OF LOW PRESSURE GATED AND MULTI-GATE FERTIRRIGATION IN SUGARCANE

Jasiel Valdivia Sánchez, Dr.

Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, 2023

ABSTRACT

Fertigation is a technique that allows improving the use of fertilization in sugarcane crops. It can be implemented in low pressure gated pipe irrigation. The objective was to define the combination of the factors duration of the fertigation application and fertilizer nitrogen doses that result in the highest fertigation efficiency indexes and production per surface unit, as well as the correlation between these two variables in agroecosystems with sugarcane under low pressure gated pipe irrigation in Los Ídolos, Actopan municipality, Veracruz. In a factorial experiment 2^2 the nitrogen dose in fertigation (80.5 and 161 kg N ha⁻¹) plus 100 kg N of base fertilization, and duration of fertilizer injection during fertigation (50 and 100 minutes) factors were evaluated and a control treatment that consisted of conventional fertilization (261 kg N in two applications). The response variables were distribution uniformity in the lowest quarter ($UD\frac{1}{4}$), Christiansen's distribution coefficient (CUC) in nitrogen in the soil after fertigation, production per surface unit, water footprint and nitrogen absorption efficiency. The results indicate that there is no significant difference (Duncan, $\alpha = 0.05$) in the values of $UD\frac{1}{4}$ and CUC between the treatments. The water footprint tends to be lower in treatments where the nitrogen dose is lower, and the fertigation time is longer. The production per surface unit of sugarcane increases significantly when the duration of fertigation goes from 50 to 100 minutes. Nitrogen dose had no significant effect. It can be concluded that low doses of nitrogen applied in fertigation with a duration of 100 minutes increase yields as compared to conventional fertilization. With this information, recommendations can be made for the implementation of fertigation in sugarcane with low pressure gated pipe irrigation in sugar cane.

Key words: furrow fertigation, low-pressure irrigation, gated pipe, simulation, Veracruz.

AGRADECIMIENTOS

Al pueblo de México por la beca de manutención otorgada a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) para poder hacer posible los estudios de doctorado.

Al Colegio de Postgraduados por ser la institución que alberga al conjunto de personas dispuestas a brindar lo mejor de sí en la formación de recursos humanos de elevada capacidad; y que me albergó y brindó los recursos necesarios para llevar a cabo los estudios de doctorado y que hoy culmino.

Al Dr. Juan Pablo Martínez Dávila por su apoyo y extrema paciencia durante la etapa final en la culminación del grado de doctor.

Al Dr. Arturo Pérez Vázquez, por su paciencia y expedito trabajo en responder con sus sugerencias y guía.

A la Dra. María del Refugio Castañeda Chávez, quien además de fungir como miembro del consejo otorgó todas las facilidades para realizar parte de los análisis en el Laboratorio de Investigación en Recursos Acuícolas en el ITBoca durante la huelga.

Al Dr. Eugenio Carrillo Ávila por sus ánimos y atinados comentarios.

A todo el personal del Colegio de Postgraduados Campus Veracruz.

DEDICATORIA

Esta tesis es el producto de un esfuerzo en todos los sentidos, el cual no habría sido posible sin el amor y apoyo de todas mis mujeres, que tuvieron que soportar mis continuas ausencias y descuidos. A mis hijas Halia y Jasyeli, a mi esposa Heliane Peña Veracruz y a mi madre Margarita Sánchez Córdoba. ¡Es por y para ustedes!

- ¡Papá! ¿En tu trabajo usas bata de laboratorio?
- Sí, hija. ¿Por?
- ¿Trabajas en un laboratorio?
- Si, por eso llevo la bata.
- ¿Haces pociones?
- No las hago, pero sí uso algunas sustancias.
- Entonces... ¿Haces experimentos?
- También, precisamente estoy revis...
- ¿Eres un científico? – dijo interrumpiendo –
- Mmm... trabajo como científico, mi amor.
- No, pero tú das clases... ¡tú eres maestro!
- Dar clases es una de muchas cosas que hace un científico. Además de hacer experimentos en un laboratorio, también escriben libros y artículos, investigan en el campo, platican con las personas, y así otras cosas más.
- ¡Súper!

In memoriam

Abel Valdivia González, Aristarco Aguas Atlahua y Cesáreo Landeros Sánchez.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE CUADROS.....	xii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Marco epistemológico.....	3
2.1.1. Enfoques y posturas epistemológicos.....	3
2.1.2. La epistemología de la agroecología y los agroecosistemas.....	4
2.1.3. Paradigma de sistemas y complejidad en el estudio de los agroecosistemas.....	8
2.2. Marco conceptual.....	10
2.2.1. El agroecosistema.....	10
2.2.2. Epistemología y teoría de sistemas.....	14
2.2.3. Las definiciones de agroecosistema y los modelos conceptuales.....	15
2.2.4. El modelo de agroecosistema.....	17
2.2.5. El fertirriego de baja presión y multicompuerta.....	20
2.2.6. Fertirrigación en caña de azúcar.....	33
2.2.7. Técnicas de inyección de fertilizantes.....	34
2.2.8. Evaluación de la fertirrigación.....	35
2.3. Planteamiento del problema de investigación.....	43
2.3.1. Situación problemática.....	43
2.3.2. Definición del problema de investigación.....	50
III. HIPOTESIS Y OBJETIVOS.....	52
IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	54
4.1. Experimento de campo.....	54
4.1.1. Ubicación geográfica del área experimental.....	54
4.1.2. Diseño experimental.....	55

4.1.3.	Diseño de tratamientos	56
4.1.4.	Unidades experimentales	58
4.1.5.	Preparación de la solución nutritiva	58
4.1.6.	Variables respuesta	59
4.1.7.	Levantamiento y preparación de las muestras de suelo.....	63
4.1.8.	Extracción y determinación de nitrógeno del suelo	63
4.1.9.	Producción por unidad de superficie.....	63
4.1.10.	Masa de fertilizantes aplicado.....	64
4.1.11.	Parámetros de las simulaciones	64
4.1.12.	Coeficientes de infiltración	66
4.1.13.	Evaluación de las simulaciones	67
4.2.	Análisis estadístico	67
V.	RESULTADOS.....	69
5.1.	Eficiencia del fertirriego	69
5.1.1.	Uniformidad del fertirriego.....	69
5.1.2.	Uniformidad de la distribución de fertilizante mediante simulaciones...	73
5.1.3.	Eficiencia de aplicación del fertirriego.....	78
5.2.	Fertirriego y huella hídrica	79
5.3.	Fertirriego y eficiencia de la fertilización.....	84
5.4.	Rendimiento en función del tiempo y dosis de aplicación de nitrógeno en fertirriego	84
5.5.	Análisis económico de las dosis de fertilización	89
5.6.	Rendimiento en función de la uniformidad	91
5.7.	Contrastación de hipótesis	95
VI.	CONCLUSIONES	96
VII.	LITERATURA CITADA	98
	ANEXOS.....	115

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1. Evolución de las generaciones de pensamiento sistémico según Gharajedaghi (2005) y Casanova <i>et al.</i> (2016).	9
Figura 2. Modelo fusionado (MF) de componentes y procesos del agroecosistema (Modificado de Martínez-Dávila, 2010).	18
Figura 3. Esquema del agroecosistema caña de azúcar bajo investigación.	19
Figura 4. Relación entre los métodos para medir la eficiencia del nitrógeno y diferentes indicadores.....	38
Figura 5. Problemática del agroecosistema con caña de azúcar.	47
Figura 6. Ubicación de la parcela experimental con respecto al Distrito de Riego 035 (- -) La Antigua, el municipio de Actopan (---), el estado de Veracruz (---) y de la República Mexicana.	54
Figura 7. Esquema de puntos de muestreo de suelo en cada unidad experimental. A: Inicio del surco y entrada del agua; B, C, D, E y F son puntos de muestreo 0,1 ,2 ,3 y 4.	61
Figura 8. Variables geométricas del surco consideradas para las simulaciones (z = pendiente o talud de la sección).	65
Figura 9. Valores porcentuales del CUC y $DU\frac{1}{4}$ en función del tiempo y dosis de nitrógeno en fertirriego. a) Promedio de tres bloques en el primer evento de fertirriego; b) promedio de los tres eventos de fertirriego en el bloque uno.	72
Figura 10. Relación entre los valores de $UD\frac{1}{4}$ y CUC simulados con los observados. 76	
Figura 11. Precios de la tonelada de urea a granel desde enero de 2009 a diciembre de 2022.	89
Figura 12. Relación entre la producción por unidad de superficie con la uniformidad de la distribución del cuarto más bajo ($UD\frac{1}{4}$ ----) y el coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC ----) de nitrógeno amoniacal del suelo en todas las parcelas del primer evento de fertirriego (a) y en la parcela número uno en los tres eventos de fertirriego (b).	93

Figura 13. Valores de $UD_{1/4}$ y CUC simulados (s) y observados (o) en función de la eficiencia de aplicación. 94

LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Comparación de las visiones galileana y aristotélica de la ciencia.	4
Cuadro 2. Definiciones simples de agroecosistema.	10
Cuadro 3. Referencia y conceptualización del concepto de agroecosistema.	12
Cuadro 4. Características de artículos sobre fertirriego superficial.	26
Cuadro 5. Categorías de análisis y su descripción del fertirriego superficial.	27
Cuadro 6. Características de artículos sobre fertirrigación en caña de azúcar.	31
Cuadro 7. Datos de ingresos estimados por producción de caña de azúcar a partir de datos de producción en el distrito 035 La Antigua.	44
Cuadro 8. Descripción de la fertilización convencional utilizada en la zona de estudio.	56
Cuadro 9. Descripción de los niveles del factor dosis de nitrógeno en fertirriego.	56
Cuadro 10. Descripción de los niveles del factor duración del fertirriego.	57
Cuadro 11. Codificación y valores correspondientes de los tratamientos evaluados.	57
Cuadro 12. Fechas de los eventos de fertirriego y, de siembra y cosecha de la caña de azúcar en la parcela experimental.	58
Cuadro 13. Gasto de inyección de la solución nutritiva y volumen final inyectado de acuerdo con los niveles de la variable tiempo de fertirriego.	59
Cuadro 14. Masa de urea aplicada en cada fertirriego en los tratamientos de 161 y 80.5 kg N en fertirriego en cada evento.	64
Cuadro 15. Valor de Pr > F de las variables respuesta CUC y UD _¼ en función de tiempo de fertirriego y de la dosis de nitrógeno.	70
Cuadro 16. Coeficiente de Uniformidad de Christiansen y desviación estándar en función del tiempo de fertirriego y dosis de nitrógeno en fertirriego.	71
Cuadro 17. Tiempo de avance en segundos a diferentes distancias a lo largo del surco, gasto de entrada de agua y de fertilizantes en el surco en el segundo y tercer evento de fertirriego en las parcelas del bloque uno.	74

Cuadro 18. Valores estimados de coeficientes de k y a del modelo de infiltración de Kostiaikov – Lewis, índices de evaluación de la simulación y criterios de selección de los valores de y y n	75
Cuadro 19. Valores porcentuales de Uniformidad de la distribución en el cuarto más bajo (UD _¼) y del coeficiente de uniformidad de Christiansen medidos y simulados en el segundo y tercer evento de fertirriego.	77
Cuadro 20. Estadísticas de regresión entre valores simulados y valores medidos de UD _¼ y CUC de nitrógeno en el fertirriego.	78
Cuadro 21. Valor porcentual de eficiencia de aplicación en el segundo y tercer evento de fertirriego.	79
Cuadro 22. Agua verde y azul de la evapotranspiración basada en la tabla de resultado de requerimiento de agua del cultivo del CropWat 8.0.	80
Cuadro 23. Cálculo de uso de agua del cultivo (UAC) verde, azul y total a partir de los datos de los componentes de evapotranspiración verde y azul del requerimiento de agua del cultivo.	81
Cuadro 24. Huella hídrica total en la producción de caña de azúcar en Actopan, Veracruz bajo los tratamientos de dosis de nitrógeno y tiempo de fertirriego	82
Cuadro 25. Eficiencia de uso de nitrógeno (EUN), Eficiencia de absorción de nitrógeno (EaN) y los componentes masa de producto de interés (Gw), nitrógeno de la planta (Nt) y nitrógeno del suelo (Ns) estimados en las unidades experimentales en el bloque uno.....	83
Cuadro 26. Eficiencia de uso de nitrógeno y eficiencia de absorción de nitrógeno como resultado de los niveles de dosis de nitrógeno y tiempo de fertirriego.	85
Cuadro 27. Análisis de varianza bidireccional de rendimiento en función de la dosis de nitrógeno y tiempo de fertirriego.	85
Cuadro 28. Rendimiento promedio de caña de azúcar y grupos de la comparación entre tratamientos.	86
Cuadro 29. Análisis de varianza bidireccional de rendimiento en función de la dosis de nitrógeno y tiempo de fertirriego.	87

Cuadro 30. Producción en toneladas por hectárea de caña de azúcar bajo los tratamientos de dosis de nitrógeno y tiempo de fertirriego.	87
Cuadro 31. Rendimiento, ingresos, costo de fertilizantes y comparativa de ingresos con respecto al tratamiento de fertilización convencional de los tratamientos de fertirriego.....	90
Cuadro 32. Estadísticas de regresión del rendimiento en función de los indicadores de uniformidad en la distribución de nitrógeno amoniacal observado.	92

I. INTRODUCCIÓN

Desde hace siglos la producción de caña de azúcar es una parte importante de la economía en el nivel local, estatal y nacional. Sin embargo, a medida que el mundo se ha vuelto cada vez más consciente de los impactos negativos de la agricultura industrial en la salud humana y en el medio ambiente, la producción de caña de azúcar no ha dejado de ser blanco de críticas y controversias. La producción de caña de azúcar conlleva una serie de labores que en mayor o menor medida agregan costos económicos y ambientales inherentes al manejo dado por los agricultores. El riego y la fertilización son dos labores que implican altos costos por los recursos naturales y económicos necesarios para la producción de caña de azúcar. Sin embargo, el manejo que se les suele dar es ineficiente. Se considera que solo en el transporte de agua a través de canales de riego de tierra implica una pérdida de alrededor del 50 %, mientras que los fertilizantes que se aplican se pierden por escurrimiento, volatilización y lixiviación, mismos que no son ajenos en la superficie controlada por productores que integran el proyecto "El Manzano".

El proyecto "El Manzano" fue creado en el año 2010 para resolver los problemas de infraestructura de riego enfrentados por un grupo de productores en el Módulo de Riego II-1 Actopan, Veracruz. La dificultad se debía a que las parcelas estaban situadas por encima del nivel de los canales de distribución de agua diseñados por el Distrito de Riego 035 La Antigua, Veracruz. El proyecto consistió en diseñar y construir un sistema de distribución de agua que aprovechara el desnivel entre el canal principal agua arriba y las parcelas. Este sistema incluía tuberías con diámetros diferentes que transportaban el agua hasta las parcelas. De forma complementaria se utilizan tuberías con multicompuertas para distribuir el agua en las parcelas. Este proyecto aumentó la eficiencia de distribución de agua al reducir la infiltración en los canales. Sin embargo, aún se utilizaban métodos tradicionales para aplicar los fertilizantes. Por tanto, se propuso implementar el fertirriego de baja presión para una aplicación más eficiente y controlada de los fertilizantes. Esto permitiría aumentar la eficiencia en el manejo del nitrógeno y la relación costo-beneficio de la aplicación de fertilizantes.

Para implementar el fertirriego de baja presión y multicompuerta se diseñó un inyector tipo Venturi expresamente para las características hidráulicas de las instalaciones, mismo que fue diseñado y evaluado por García-Saldaña (2018). Sin embargo, aún era necesario conocer los parámetros adecuados de operación del fertirriego. Para tal propósito, en la presente investigación de tesis se responden a las siguientes preguntas de investigación: ¿Cuáles son los valores de los factores tiempo fertirriego y dosis de nitrógeno fertilizante que den como resultados los mayores índices de eficiencia del fertirriego y rendimiento del sistema de producción de caña de azúcar con las características dadas por el riego de baja presión y multicompuerta característicos en el área de estudio? y ¿Cuál es la relación entre la índices de eficiencia del fertirriego con la producción por unidad de superficie de caña de azúcar y la eficiencia en el uso del agua y fertilizantes? Al responder las preguntas planteadas será posible implementar el fertirriego y lograr con ello un mejor aprovechamiento de fertilizantes y reducir el impacto ambiental y económico en los agroecosistemas con caña de azúcar bajo sistemas de riego de baja presión y multicompuerta.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco epistemológico

Padrón (2007) indica que la epistemología es una teoría del conocimiento de carácter científico (usado en este sentido en Latinoamérica), diferenciándolo de la gnoseología, que es más bien una teoría del conocimiento general.

2.1.1. Enfoques y posturas epistemológicos

La epistemología, entendida como la ciencia que estudia a la ciencia, ha adoptado diversos sistemas de clasificación, agrupando a las ciencias bajo diferentes criterios o enfoques: 1) el criterio que las diferencia como ciencia cuantitativa y ciencia cualitativa, 2) perspectiva subjetivista y objetivista, 3) ciencias del espíritu y ciencias materiales; y 4) ciencias “Empírico-Analíticas”, “Histórico- Hermenéuticas” y “Teórico-Críticas” (Padrón, 2007). Este mismo autor reconoce que la última clasificación no es clara respecto a los límites de cada una y acusándolo de ser una clasificación *ad hoc*, y hace una propuesta de cuatro enfoques con base en dos variables: una gnoseológica y una ontológica, teniendo así: Empirismo-idealismo, empirismo-realismo, racionalismo- idealismo y racionalismo-realismo.

Aparte de los criterios diferenciadores, históricamente se han distinguido dos tipos de ciencia con planteamientos diferentes con base en “*las condiciones que han de satisfacer una explicación que se quiera denominar científica*”: La tradición aristotélica y la galileana (Mardones y Ursúa, 1982). En el Cuadro 1 se ejemplifican las diferencias entre dichas tradiciones.

Así mismo, dentro de la corriente aristotélica se distinguen dos posturas, por un lado, la postura “fenomenológica hermenéutica y lingüística”, y por el otro la postura dialéctica o crítico hermenéutica. En estas dos posturas priorizan los conceptos de emancipación social sobre la eficiencia financiera y económica; y la comprensión ante la explicación.

Por el contrario, dentro de la corriente galileana se encuentra la postura empírico-analítica en esta postura priman los conceptos de eficiencia financiera y económica (Mardones y Ursúa, 1982; Cruz-Bautista *et al.*, 2017; Calderón-Bolaina, 2018). Como ejemplo de la corriente galileana podemos citar el Círculo de Viena y de las aristotélicas sus principales representantes son los participantes de la escuela de Frankfurt. La filosofía sustentada en el Círculo de Viena ha sido heredada a otras ciencias y científicos hasta nuestros días, dándole forma a la ciencia que se conoce como disciplinar.

Cuadro 1. Comparación de las visiones galileana y aristotélica de la ciencia.

	Galileana	Aristotélica
Describe al mundo como:	explicación causal	explicación teleológica
Responde a las preguntas:	¿Cómo?	¿Por qué? y ¿Para qué?
Es de interés:	funcional y mecanicista	metafísica y finalista
La posición del objeto de estudio:	Las cosas giran en torno al conocimiento	El entendimiento gira entorno a las cosas
Coloca en el centro del universo a:	El mundo.	El hombre.
Concibe al universo como:	Flujo de acontecimientos que se suceden según leyes.	conjunto de sustancia con sus poderes

Modificado de (Calderón-Bolaina, 2018)

2.1.2. La epistemología de la agroecología y los agroecosistemas

El agroecosistema es la unidad de estudio de la agroecología (Lugo-Perea y Rodríguez-Rodríguez, 2018; Ruiz-Rosado, 2006; Wezel y Soldat, 2009) y por otro lado, la agroecología es una disciplina científica que integra diferentes disciplinas (Wezel y Soldat, 2009). Por lo tanto, para definir el agroecosistema, primero nos remitiremos a la definición de la agroecología.

La agroecología es interpretada de tres maneras: como ciencia, movimiento social o como una práctica agrícola, aplicada a varias escalas: granja, agroecosistema, sistema alimentario (Wezel y Soldat, 2009). Como ciencia, la agroecología no presenta una única definición, siendo estas adoptadas a partir de los intereses y objetivos que se persiguen al ser abordadas. Como movimiento social, esta intenta acercar a la agricultura con la sociedad surgiendo como un movimiento ambiental en contra de la agricultura industrial, y como práctica agrícola es concepto contracultural a la agricultura industrializada (Wezel y Soldat, 2009). Así mismo, Wezel y Soldat (2009), definen a la agroecología como una ciencia que integra diversas disciplinas como la agronomía y la ecología¹. Gómez *et al.* (2015) han hecho notar que diversos autores se refieren a ella como práctica interdisciplinaria o que busca integrar diferentes disciplinas, mencionando autores como Altieri, Gliessman o Francis. Lugo-Perea y Rodríguez-Rodríguez (2018), definen a la agroecología como estilo de vida, movimiento social o ciencia; “surgida como un movimiento con perspectiva crítica y propositiva en franca confrontación con las prácticas guiadas por la filosofía capitalista imperante en los países desarrollados en los años sesenta y setenta”. Aunque dan su definición como ciencia, su discurso es enmarcado en una corriente galileana, que hace ver a la agroecología como una “agronomía ecologizada”. Wezel y Soldat (2009) presentan dos definiciones de agroecología, la primera es de Francis: ... *“El estudio integrador de la ecología de todos los sistemas alimentarios, que abarca dimensiones ecológicas, económicas y sociales, o más simplemente la ecología de los sistemas alimentarios”*. La ecología de los sistemas alimentarios se aproxima a la definición de Martínez-Dávila y Casanova-Pérez (2018) cuando indican que el término “eco” se refiere a la perspectiva en términos de estructura y función; así, la agroecología es definida como “la ciencia que estudia en su conjunto a todos los elementos y sus relaciones que constituyen un sistema (agro) alimentario”, de manera análoga a lo que llamaríamos ecología marina para la interrelación de elementos marinos. Otra definición dada por Wezel y Soldat (2009) es la de Gliessman (2007): “la

¹ El ecosistema también es un sistema y no es tampoco una cosa, sino que vemos a las cosas como una representación sistémica.

ciencia de aplicar conceptos y principios ecológicos al diseño y gestión de sistemas alimentarios sostenibles²”.

Así como al surgir como un movimiento que buscaba ser una alternativa dentro de las ciencias, a la agricultura industrial, la agroecología también busca ser alternativa a la ciencia convencional. Como lo indican Gómez *et al.* (2015): “*La agroecología ha sido enfática en que debe partir de unas bases epistemológicas distintas a las de la ciencia convencional para enfrentar de manera efectiva los problemas ambientales producto de la agricultura industrial*”, [...] “*La crítica de la agroecología a las bases epistemológicas de la ciencia moderna convencional se ha centrado básicamente en tres aspectos: la disciplinariedad, el monismo epistemológico y el principio de simplicidad*”. Por tanto, debe fundamentarse sobre bases epistemológicas distintas a las de la ciencia convencional. Para cada uno de estos principios se han propuesto alternativas para lograr una agroecología auténticamente alternativa.

Gómez *et al.* (2015), concluyen que, las alternativas para dichos principios epistemológicos son 1) Disciplinariedad: la multidisciplinariedad, la interdisciplinariedad y la transdisciplinariedad; 2) para el pluralismo epistemológico este debe articular las ciencias sociales, naturales y la integración del conocimiento tradicional; y 3) el holismo, la complejidad y la sistémica como alternativas al principio de simplicidad. Apoyada en estas alternativas, la agroecología aspira a dejar de ser una ciencia, disciplinaria integradora de distintas disciplinas, y a ser una ciencia alternativa con carácter propio.

En la agroecología, como nuevo enfoque para el estudio de la realidad agrícola se encuentra implícito el pensamiento sistémico (Casanova *et al.*, 2016). Además de un abordaje transdisciplinar y plural epistemológicamente, asociado a las corrientes identificadas. Al respecto Ruiz-Rosado (2006) remarca que “*La agroecología ha sido considerada como una disciplina o ciencia, teniendo como unidad de análisis al*

² Entendiendo la sostenibilidad como: “la capacidad de las sociedades humanas para satisfacer sus necesidades presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas.”

agroecosistema; sin embargo, sus componentes teóricos y metodológicos son derivados de herramientas científicas disponibles o las complementa con la intervención de varias disciplinas, por lo que la agroecología es algo más que una disciplina per se". Lo que nos está indicando es que la agroecología es una ciencia multi y transdisciplinar por concepto.

En lo que al pluralismo epistemológico refiere, se toman epistemologías de las corrientes galileanas y aristotélicas, en la que se conjuntan las ciencias naturales y sociales para un mejor entendimiento de la realidad agrícola compleja. (Cruz-Bautista *et al.*, 2017) indican que *"El enfoque de teoría de los sistemas sociales autopoieticos se encuentra ubicado en la corriente galileana, donde se ha buscado el dominio y control de la naturaleza, para maximizar las ganancias; además de que también se consideran, eventualmente, elementos de la hermenéutica y fenomenología; escasamente se han tenido ideas de emancipación social. El cuerpo teórico que ofrece Luhmann muestra claramente la importancia de complementar los métodos, con el fin de mejorar la explicación y comprensión de los fenómenos complejos."* Es decir, retomar que en el estudio de la agroecología y de los agroecosistemas se deben de tomar posturas tanto positivistas como dialécticas. Por otro lado, Gómez *et al.* (2015), indican que el pluralismo epistemológico implica la incorporación de conocimiento tradicional como el campesino, indígena o afro; al discurso del conocimiento científico. Sin embargo, tal afirmación sería contradictoria en el sentido de que el conocimiento tradicional no es del tipo científico, sino el dóxico. Martínez-Dávila y Casanova-Pérez (2018) ejemplifican lo anterior al remitirnos a la teoría del conocimiento de Platón. En el que se distinguen el conocimiento proveniente de la cotidianidad (*doxa*), del conocimiento científico, proveniente de la capacidad de conceptualizar lo observado y/o sentido, a través de la formulación de modelos que nos ayude a entender la realidad (*dóxica*). Por lo que puede considerarse al conocimiento tradicional objeto de estudio de la ciencia.

La agroecología aspira a ser una ciencia alejada de la simplicidad, para lo cual se erige como una ciencia que aborda los problemas desde el holismo, la complejidad y la teoría sistémica. De acuerdo con Caporali (2007), la ecología, implica un principio integrador:

el paradigma de sistemas. Con esto se genera el concepto de ecosistema, el cual se define como un modelo de la realidad y su representación. De manera análoga, al aplicarse a la agricultura, se obtiene un modelo que representa a la agricultura, el agroecosistema como modelo de estudio de la agroecología. Por tanto, el paradigma de sistemas aplicado a la agricultura, es un modelo, que sirve como herramienta teórica y metodológica, que nos permite analizar una realidad empírica (Martínez-Dávila y Casanova-Pérez, 2018).

La agroecología como una ciencia tiene como objeto de estudio al agroecosistema. Es por definición una ciencia integradora de otras ciencias. Esto le da una flexibilidad que le permite abordar los problemas aplicando principios, leyes y/o teorías provenientes de otras ramas del conocimiento, como: la sistémica, el holismo y la complejidad.

2.1.3. Paradigma de sistemas y complejidad en el estudio de los agroecosistemas

Para Caporali (2007) el ecosistema y el agroecosistema son modelos que, epistemológicamente, satisfacen las cuatro causas del conocimiento mencionadas por Aristóteles: causa eficiente, causa formal, causa materia, y causa final, la cual se diferencia de las ciencias galileanas que solo se enfocan en la causa material (Mardones y Ursúa, 1982)

Sin embargo, el paradigma de los sistemas se ha enmarcado en la corriente galileana. Su precursor Ludwig Von Bertalanffy se declaró influido profundamente por las ideas del Círculo de Viena. Aunque las ideas y principios de la teoría de sistemas se gestaron dentro de esta corriente, se percibe que el estudio de los agroecosistemas tiende hacia una diversidad epistemológica y metodológica que ayuden a comprender la complejidad dentro de los sistemas (Casanova *et al.*, 2016).

El estudio de los sistemas mismos ya ha pasado por tres etapas de evolución desde que fueron propuestos por Von Bertalanffy. Estas generaciones mencionadas por Gharajedaghi (2005) indica una evolución desde los sistemas mecánicos, hacia los

sistemas socioculturales. Lo anterior se ejemplifica en la Figura 1. Casanova *et al.* (2016) proponen que actualmente nos encontramos al inicio de una cuarta generación de sistemas: la de los sistemas auto replicantes o autopoieticos.

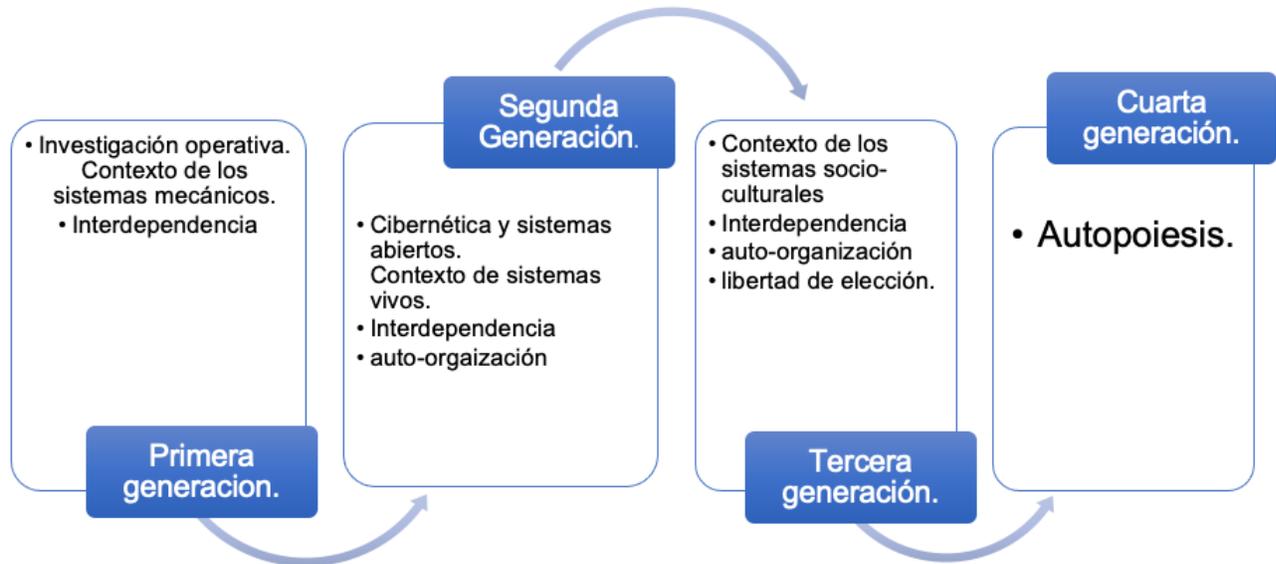


Figura 1. Evolución de las generaciones de pensamiento sistémico según Gharajedaghi (2005) y Casanova *et al.* (2016).

Al ser abordados con un pensamiento sistémico de tercera y cuarta generación, los agroecosistemas, y por ende la agricultura, se entienden como un fenómeno social, en el cual el ser humano y la sociedad en su conjunto interactúan con su ambiente y recursos tecnológicos para perseguir los objetivos que ellos mismo deciden y que además reproducen sus procesos y actitudes.

2.2. Marco conceptual

2.2.1. El agroecosistema

En la actualidad existen diversas perspectivas y corrientes en el estudio de los agroecosistemas. Para entender lo que el agroecosistema es, se analizan tres definiciones simples: ecosistema modificado, espacio para la producción agrícola y modelo conceptual. Cada autor expresa, directa o indirectamente, la definición más apegada a su propia visión. A partir de estos conceptos simples, los diversos se enmarcan en paradigmas de análisis de los agroecosistemas, por ejemplo: sistemas sociales, sustentabilidad, producción orgánica, etc. También los agroecosistemas son estudiados desde diferentes posiciones disciplinarias: desde la economía, la sociología, la complejidad, ecología, agronomía, ciencias ambientales, etc. (Cuadro 2).

Cuadro 2. Definiciones simples de agroecosistema.

Definición	Referencia
Ecosistema modificado	Conway (1985); Altieri (1995, 2002); Wezel y Soldat (2009)
Espacio para la producción agrícola	Gliessman <i>et al.</i> (1998); Belcher <i>et al.</i> (2004) y Peterson <i>et al.</i> (2017)
Modelo conceptual	Casanova-Pérez <i>et al.</i> (2017) y Platas-Rosado <i>et al.</i> (2017)

El concepto de agroecosistema está ligado al de agroecología, siendo su objeto de estudio. La primera referencia hecha al concepto y definición de agroecosistema fue propuesta por Odum (1965, citado por Altieri, 1995 y Wezel y Soldat, 2009). Estos autores definen al agroecosistema como un ecosistema domesticado, un intermedio entre ecosistemas naturales y modificados. Para Altieri (1995), esta definición de Odum se queda corta criticando además que: no expresa la diversidad de los sistemas que no son basados en el modelo de producción de los Estados Unidos de Norteamérica, como por ejemplo, los agroecosistemas tropicales. Sin embargo, el mismo Altieri (2002) define a los agroecosistemas en términos de comunidades de plantas y animales: “Los

agroecosistemas son comunidades de plantas y animales interactuando con su ambiente físico y químico que ha sido modificado por el hombre para producir comida, fibras, combustibles y otros productos para el consumo y procesamiento por los humanos". Esta definición continua con la línea de Odum, ya que define al agroecosistema como una comunidad (de plantas y animales) modificada; y si entendemos como comunidad de plantas y animales a un ecosistema, entonces su definición sigue siendo un "ecosistema modificado". Esta definición ha sido retomada por diversos autores como Conway (1985) y Cutz-Pool *et al.* (2007).

Conway (1985) por su parte aborda la agricultura como un proceso que llevó a la transformación de los ecosistemas en agroecosistemas: *"En el desarrollo agrícola, los ecosistemas son transformados en agroecosistemas híbridos con el propósito de producir comida o fibras"*. Con estos tres ejemplos se pueden ilustrar una serie de autores que se apegan la definición de agroecosistema como un ecosistema modificado.

En cuanto al agroecosistema como un espacio para la producción agrícola, Xu y Mage (2001) definen que un agroecosistema es *"una unidad funcional para la producción de bienes (productos) agrícolas y como proveedor de servicios rurales los cuales incluyen un conjunto de elementos relacionados agrícolamente y las interacciones entre dichos elementos."* Esta definición es a su vez parece tomada de Gliessman *et al.* (1998), quien define el agroecosistema como *"un sitio para la producción agrícola entendido como un ecosistema"*, este autor indica tácitamente que el agroecosistema es utilizado con fines agrícolas, que: *"surge cuando la manipulación humana transforma un ecosistema en un espacio para la producción agrícola"* (Cuadro 3). En esta definición caerían la mayoría de las referencias respecto al agroecosistema en la producción agrícola, por ejemplo: Schmidt *et al.* (2018); Xiao *et al.* (2019); Zabala *et al.* (2019); Liu y Song 2020; Mohammadi-Ahmadmahmoudi *et al.* (2020); y estos último en el contexto del análisis de agroecosistemas bajo riego, en los que no definen el concepto de agroecosistema, tomándolo como sinónimo de granja y/o espacio definido para la producción agricultura.

Cuadro 3. Referencia y conceptualización del concepto de agroecosistema.

Referencia.	Concepto de agroecosistema.
Xu y Mage (2001)	Un agroecosistema debe ser definido como una unidad funcional para la producción de bienes (productos) agrícolas y como proveedor de servicios rurales los cuales incluyen un conjunto de elementos relacionados agriculturalmente y las interacciones entre dichos elementos. La noción de agroecosistema representa una manera de percibir la agricultura, particularmente sus relaciones productivas-ambientales, en términos de sistemas.
Conway (1985)	En el desarrollo agrícola, los ecosistemas son transformados en agroecosistemas híbridos con el propósito de producir comida o fibras.
Altieri (2002)	Los agroecosistemas son comunidades de plantas y animales interactuando con su ambiente físico y químico que ha sido modificado por el hombre para producir comida, fibras, combustibles y otros productos para el consumo y procesamiento por los humanos.
Belcher <i>et al.</i> (2004)	Los agroecosistemas modernos son sistemas complejos hechos de conjuntos integrados de capitales humanos, naturales y materiales que corresponden con los factores estándar de la producción, capital, labor y tierra (Costanza y Daly, 1992).
Caporali (2007)	El agroecosistema es un ecosistema modificado, usado con propósitos agrícolas, así como el modelo que los representa.
Peterson <i>et al.</i> (2017)	Pero el concepto subyacente es que un agroecosistema saludable es económicamente viable, gestionado de manera socialmente responsable y ambientalmente sostenible para las generaciones presentes y futuras.
Wezel y Soldat (2009)	[Son] ecosistemas domesticados, intermedios entre ecosistemas naturales y fabricados, cita a Odum como el primero en definir al agroecosistema. .
Cutz-Pool <i>et al.</i> (2007)	Las comunidades de meso fauna del suelo pueden ser alteradas por las actividades humanas como la transformación de ecosistemas naturales en agroecosistemas y la introducción de sistemas de riego.

Diversos enfoques de agroecosistema han sido hechos a partir de la definición de espacio para la producción. Peterson *et al.* (2017) propone enfoque de sostenibilidad³ para la evaluación de la salud de los agroecosistemas, en un contexto en que las empresas e iniciativas agrícolas buscan evaluar el impacto de sus actividades sobre indicadores ambientales de extensos espacios agrícolas con la justificación de buscar validación de la percepción social del impacto en el ambiente de sus actividades o negocios. Belcher *et al.* (2004) por su parte, definen al agroecosistema como sistemas complejos hechos de conjuntos capitales y factores como: capital, labor y tierra, para la producción agrícola. Si bien su definición es más de carácter económico, sigue considerando al agroecosistema como un espacio para la producción, pero desde un enfoque de sistema complejo.

El agroecosistema definido como un modelo conceptual conjunta principios y conceptos de la teoría general de sistemas y de la cibernética. Conway (1985) propone el análisis de los agroecosistemas desde un punto de vista sistémico. Este autor aborda el agroecosistema desde la definición de sistema como un *“conjunto de elementos contenidos dentro de límites de manera que los elementos dentro del límite tienen fuertes relaciones funcionales entre sí, pero relaciones limitadas, débiles o inexistentes con elementos en otros conjuntos”*, es decir, parte de una definición de sistema, el cual a su vez se vale de límites. El mismo autor indica que los límites del agroecosistema se pueden colocar a diferentes niveles de tal manera que incluyan elementos a diferentes niveles jerárquicos de acuerdo con la cantidad de elementos que se quieran estudiar. Sin duda entre mayor la cantidad de elementos que se considere, mayor la cantidad de relaciones e interacciones que se tengan.

Otra definición se agroecosistema como un modelo proviene de la teoría de sistemas complejos. Esta teoría establece que un sistema complejo es: *“una representación de un recorte de la realidad, conceptualizado como una totalidad organizada, en el cual los*

³La palabra sustentabilidad proviene del latín sustinere que significa sostener o sujetar desde abajo. La real academia de la lengua española en su versión en línea enlaza las dos palabras sustentar y sostener ([ASALE y RAE, 2022](#)).

elementos no son separables y por lo tanto no pueden ser estudiados aisladamente” (García, 2006). El mismo autor indica que *“la realidad empírica carece de límites precisos en extensión como en problemática”*.

Para Martínez-Dávila (2010), los límites del agroecosistema se establecen en el nivel mínimo del control del hombre sobre el ambiente. Posteriormente (Casanova-Pérez *et al.*, 2017; Martínez-Dávila y Casanova-Pérez, 2018), definen que el agroecosistema es *“un modelo conceptual, un recorte u abstracción de la realidad, en un sentido científico de una realidad dóxica”* y también como *“un modelo conceptual que representa a la realidad agrícola”*. En este sentido abstrayéndose de los factores del medio ambiente y considerando, además, literalmente, a la totalidad de la realidad agrícola. Para su estudio se ha conceptualizado como un modelo conceptual, una herramienta científica y epistemológica que facilita su estudio científico (Caporali, 2007).

Puede haber confusiones respecto a que si el agroecosistema es un ente que existe en la realidad como lo podría ser el espacio destinado a la producción agrícola o incluso como un ecosistema modificado; o un modelo, el cual representa a la realidad agrícola. Para develar lo anterior, se analiza los fundamentos teóricos y epistemológicos de la teoría general de sistemas que permitan develar si el Agroecosistema es un ente real o un modelo.

2.2.2. Epistemología y teoría de sistemas

Desde de la agroecología, el estudio de los agroecosistemas está basado en el paradigma de los sistemas (Caporali, 2007). El cual a su vez está dentro la tradición científica galileana, en la que predominan los principios del manejo y control de la naturaleza para fines empresariales y de eficiencia económica (Cruz-Bautista *et al.*, 2017). Desde sus orígenes la teoría de sistemas, atribuida a Von Bertalanffy, mantiene una relación cercana con el positivismo y el empirismo lógico, ambas dentro de la corriente galileana de las ciencias. Una de las características de la ciencia galileana es su fundamento cartesiano, apegada al dualismo sujeto-objeto, con lo cual tiende a la

necesidad de la definir el estatus de la realidad de sus objetos, así como el desarrollo de sus instrumentos analíticos (Arnold y Osorio, 1998). De acuerdo con la Teoría General de Sistema (TGS), los fenómenos a estudiar son modelos o abstracciones de la realidad.

Los modelos pueden clasificarse en sistemas reales y sistemas ideales⁴ (Arnold y Osorio, 1998). Una abstracción científica es un experimento teórico el cuál a su vez está sujeto a la verificación instrumental y por lo tanto a la validez científica (Rojas-Piloni, 2007). Goode y Hatt, citados por Martínez-Dávila y Casanova-Pérez (2018) indican que los fenómenos estudiados son abstracciones de la realidad y estas abstracciones o conceptos pueden confundirse con el fenómeno en sí⁵. Este es un error común llamado objetivación⁶ (Martínez-Dávila y Casanova-Pérez, 2018).

2.2.3. Las definiciones de agroecosistema y los modelos conceptuales

De acuerdo con lo establecido anteriormente, puede llegar a ser fácil asumir, de manera errónea, que los conceptos existen en la realidad. La tarea científica, desde el punto de vista de Thomas Kuhn, consiste en proponer enunciados, o un sistema de enunciado, y luego ponerlos prueba en relación con un conjunto de hipótesis y conocimientos que son aceptados o no por la comunidad científica a través de la comprobación (Rojas-Piloni,

⁴"los sistemas pueden agruparse en sistemas reales (DOXA), que son los que presumen una existencia independiente del observador y que esperan a ser descubiertos; los ideales que son construcciones simbólicas como las matemáticas y la lógica; y modelos, que abstracciones de la realidad" (Arnold y Osorio, 1998).

⁵"La ciencia se abstrae de la realidad y examina ciertos aspectos de los fenómenos y no la totalidad de los fenómenos en sí. En verdad, separar cualquier fenómeno de aquel con el que se relaciona constituye un hecho de abstracción. [...] Sin embargo, debido a que estamos tratando directamente solo con los conceptos, está claro que el concepto puede confundirse con el fenómeno de lo que se supone que es un símbolo".

⁶"Este es un error común llamado objetivación. A menudo se olvida que los conceptos son construcciones lógicas creadas a partir de impresiones de los sentidos, percepciones e incluso experiencias complejas. La tendencia a asumir que los conceptos realmente existen ha llevado a muchos fracasos. El concepto no es el fenómeno en sí mismo; es decir, estas construcciones lógicas no existen fuera del marco de referencia establecido. La incapacidad para reconocer esta diferencia es lo que se ha llamado la falacia de la objetivación, es decir, las abstracciones se tratan como si fueran fenómenos. Finalmente, diremos que los hechos como conceptos son abstracciones, entonces solo tienen significado en un marco de referencia dentro de algún sistema teórico"

2007). El agroecosistema como modelo, es una abstracción científica sujeta a la verificación y por lo tanto a la validez. El paradigma de sistemas establece que el objeto de estudio son modelos o abstracciones de la realidad, y que dicho modelo no existe más allá que el marco referencial en el cual está basado. “El modelo es una herramienta que guía la investigación epistemológica y metodológicamente”.

La visión de un agroecosistema como un ecosistema tiene su punto de partida en un paradigma ecológico, el cual fue impulsado desde sus inicios por ecólogos que se avocaron a estudiar los procesos agrícolas y haciendo de ellos analogías con los ecosistemas naturales y generando y diseñando modelos de producción inspirados en el funcionamiento de los ecosistemas (Doré *et al.*, 2011). Esta visión ha sido criticada por el hecho que sus métodos de estudio y análisis tienen un enfoque ecológico, menospreciando la presencia de ser humano (Hernández X. citado por Martínez-Dávila y Casanova-Pérez, 2018). El agroecosistema como un espacio para la producción agrícola carece de un sustento epistemológico, llevándolo a la confusión con una agronomía ecologizada (Lugo-Perea y Rodríguez-Rodríguez, 2018), en el sentido de que sus principios son más propios de la agronomía ecologizada.

Al existir confusión entre lo que el modelo conceptual representa para el trabajo científico, puede llevar a la objetivación, llegando a confundir un ente, que es meramente un concepto con su existencia en la realidad.

El agroecosistema, es el objeto de estudio de la agroecología, la cual hereda de la teoría general de sistemas su carácter positivista. Como ciencia está apegada al dualismo cartesiano, por lo que los fenómenos que estudia son abstracciones de la realidad. Dentro del ámbito científico, el agroecosistema, al ser un objeto de estudio no puede ser otra cosa más que un modelo, una abstracción sujeta a verificación. Fuera de ello, puede caerse en la objetivación y el error de confundir un concepto meramente simbólico en algo real. En algunos casos, el modelo puede corresponder con algunas características de ecosistemas modificados o en otros pueden considerarlo un espacio y podría confundirse el concepto con la realidad, es decir, objetivar el agroecosistema.

2.2.4. El modelo de agroecosistema

Es indudable que la consideración del modelo de agroecosistema es un paso necesario para el análisis científico de los mismos. En la conceptualización del agroecosistema, Martínez-Dávila (2010) presenta un modelo fusionado de procesos y relaciones generales con la producción de Parra *et al.* (1984) con el modelo de agrario simplificado de Trebuil (1988).

El esquema del agroecosistema con caña de azúcar bajo riego de baja presión y multicompuerta se presenta en la Figura 2. En este esquema se usa un modelo funcional de entradas y salidas en el cual están integrados los elementos socioeconómicos y biofísicos; además se consideran los diferentes niveles de organización, desde el nivel atómico hasta el sistema global (mundo entero).

Por arriba del nivel atómico se encuentra el nivel molecular, donde se consideran tres tipos de moléculas. Las moléculas ya de por sí son estructuras, pero son estructuras que pueden formar otras estructuras. Hay moléculas que forman estructuras largas, repetitivas y rígidas, otras son las moléculas que forman estructuras no repetitivas, al menos no tanto como las anteriores, y no rígidas. El tercer tipo de moléculas son las que no forman estructuras. En el siguiente nivel organización se encuentran los componentes orgánicos e inorgánicos del agroecosistema.

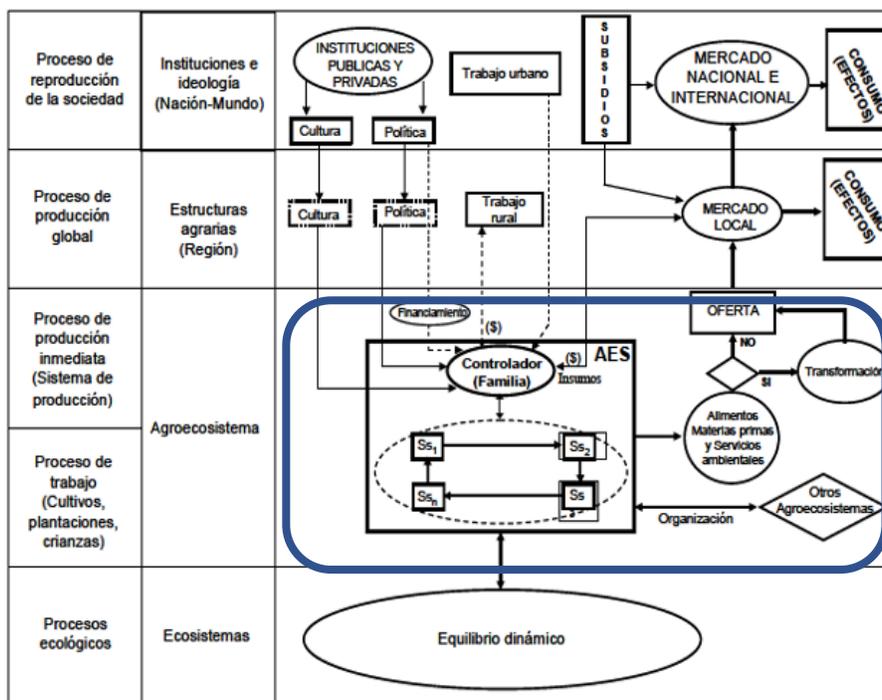


Figura 2. Modelo fusionado (MF) de componentes y procesos del agroecosistema (Modificado de Martínez-Dávila, 2010).

De las estructuras rígidas se forman los minerales que a su vez forman las partículas del suelo. Los de las estructuras no repetitivas que son las moléculas orgánicas, tanto de la materia orgánica en los organismos vivos como en la que está en descomposición. Las moléculas que no forman estructuras son las que forman los elementos fluidos como el agua y el aire, y los elementos que están disueltos en ellos. En el siguiente nivel encuentran los subsistemas del agroecosistema, los cuales son los subsistemas (SS) suelo, agua, cultivo y atmosférico. Cabe mencionar que los elementos del clima están contenidos en el SS atmósfera. Por arriba de este nivel se encuentra el que se ha definido como el agroecosistema, que integra además al controlador o productor. Por arriba del agroecosistema (unidad de estudio) se encuentra los niveles regional, nacional y mundial. El modelo contiene elementos tomados del modelo de Modelo Fusionado (MF) de los componentes y procesos del agroecosistema (Figura 3).

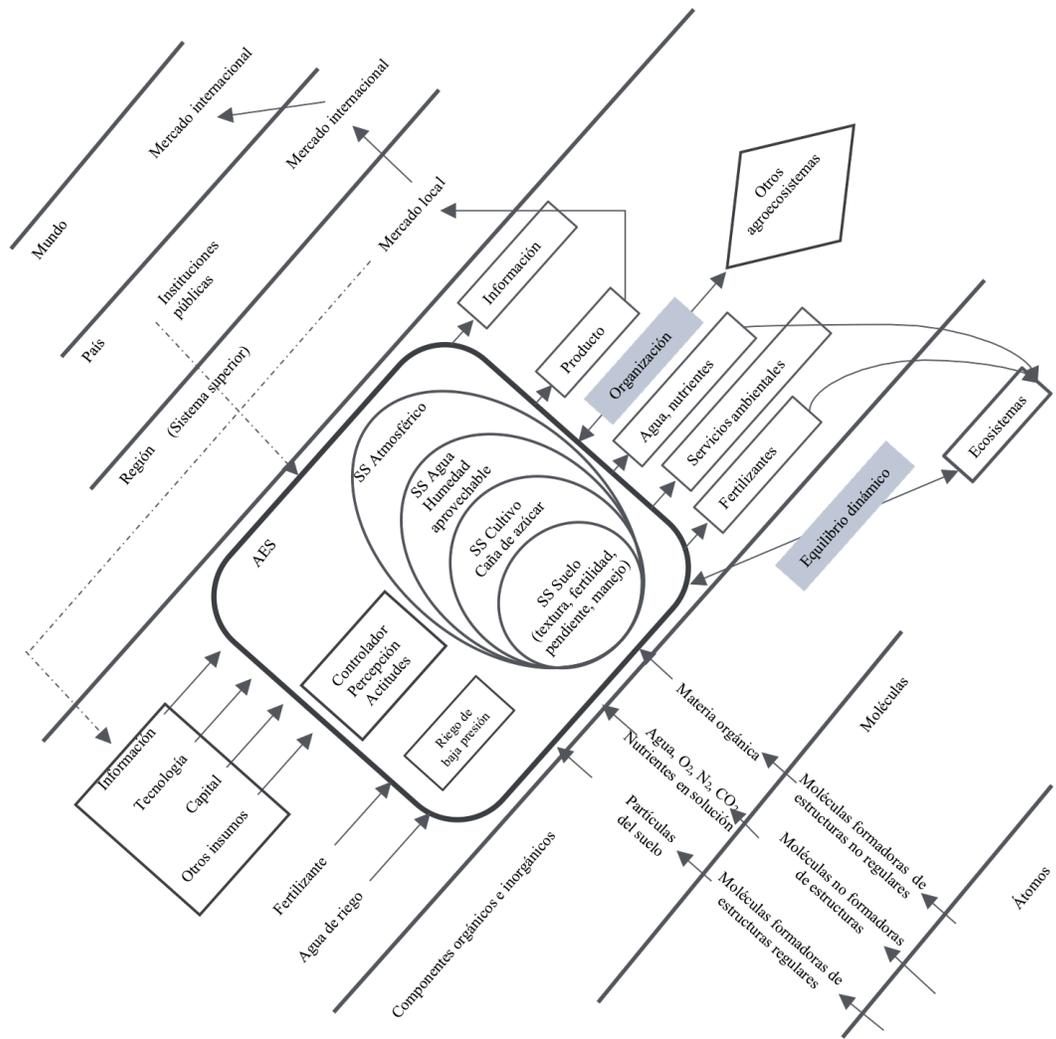


Figura 3. Esquema del agroecosistema caña de azúcar bajo investigación.

Los componentes del agroecosistema son las entradas y salidas, los subsistemas adyacentes, como el suelo, agua, cultivo y atmósfera, así como el controlador. Para el caso del agroecosistema de baja presión se considera además el componente tecnológico del sistema de riego de baja presión y multicompuerta que complementa el agroecosistema. Las salidas consideran, además del producto a comercializar o aprovechar, que es la caña de azúcar, las pérdidas de agua y fertilizante producto de la ineficiencia de las prácticas de fertilización.

El MF considera diferentes categorías de procesos ordenados con respecto a su relación con el ser humano: procesos ecológicos, procesos de trabajo, procesos de producción

inmediata, procesos de producción global y procesos de reproducción de sociedad. El MF abarca una realidad extensa y compleja que considera múltiples elementos e interrelaciones que llegan a tener un alcance global (mercado internacional). Dada la complejidad de estudiar el agroecosistema en todo su alcance, se hace necesario establecer límites que permita definir un objeto de estudio que esté al alcance operativo del investigador, su equipo y sus recursos (García, 2006; Parra *et al.*, 1984). Al acotar la investigación dentro del MF de agroecosistema se observa que la investigación está ubicada dentro del proceso de trabajo y de producción inmediata. A partir de estos dos componentes se genera un modelo de agroecosistema en el que se incluyen los flujos de agua y nitrógeno y su relación de equilibrio con el ecosistema.

2.2.5. El fertirriego de baja presión y multicompuerta

El fertirriego de baja presión y multicompuerta hace referencia al fertirriego que se aplica aprovechando la instalación de riego que incorpora un sistema de distribución de agua mediante tuberías a baja presión y dispuesta en cada surco mediante tuberías con múltiples minicompuertas.

2.2.5.1. El fertirriego

El fertirriego es la técnica mediante la cual se aplican fertilizantes a los cultivos disueltos en el agua de riego (Kafkafi *et al.*, 2012). Conceptualmente es la unión de dos elementos comunes en las diversas formas de la agricultura: riego y fertilización (Elstein *et al.*, 2004). Brunetti *et al.* (2018) lo describen como un proceso de transporte superficial y subsuperficial descrito con las ecuaciones de agua superficial (*Shallow Water*) y la ecuación de Richards. Esta última en particular describe el flujo del agua en medio parcialmente saturado (Farthing y Ogden, 2017), que expresa el fenómeno de infiltración que incluyen la advección y la difusión; y a su vez, es derivada de la ley de Darcy y de la ecuación de continuidad (Subbaiah, 2013). La ecuación de continuidad de Bernoulli para fluidos ideales describe el movimiento de agua sin pérdida ni ganancia de energía, cuyos componentes son: velocidad, gravedad, posición y presión y puede se aplica a diversos

campos de la hidráulica como los movimientos de agua en tuberías y canales. Mientras que la ley de Darcy describe el movimiento de fluidos a través de un sólido poroso, como es el suelo, y establece una relación entre la permeabilidad relativa y la presión capilar (Wang *et al.*, 2019). Los conceptos de ambas ecuaciones son del dominio de la hidráulica y esta a su vez, de la física, la cual explica la interacción de la masa del agua con la gravedad en la superficie terrestre.

El fertirriego se ha desarrollado principalmente en sistemas de riego presurizado, como el goteo y microaspersión. Sin embargo, su alcance ha sido limitado, ya que se estima que a nivel mundial el 95 % de la superficie bajo riego predominan los sistemas de riego superficial. Por mucho tiempo, estos sistemas se han considerado ineficientes, debido a pérdidas por percolación y escurrimiento. Pero en los últimos años se han desarrollado técnicas de diseño e índices que permiten mejorarlos, disminuyendo las pérdidas e incrementando la eficiencia en su aprovechamiento en el cultivo (Moravejalahkami *et al.*, 2012; Ebrahimian, 2014).

Desde el punto de vista de la agronomía, el fertirriego tiene el objetivo de lograr una mayor productividad por unidad de superficie, través del incremento en la eficiencia del uso de los recursos, como lo son el agua y nutrientes. De entre muchos principios que rigen los conceptos agronómicos aplicados a la producción, están la ley del mínimo de Justus Von Liebig, y la ley de rendimiento decrecientes de Mitscherlich (Ferreira *et al.*, 2017). Con estos principios se establece una relación entre el aporte de recursos, también llamados insumos, y los productos que se obtengan, a estas relaciones se les conoce como funciones de producción. De entre todos los factores que limitan el desarrollo de los cultivos, la más común es la falta de algún elemento mineral esencial en el suelo (Ferreira *et al.*, 2017). En la práctica, con estos conceptos establecen que existe un límite para la cantidad de insumos aplicados en función de la productividad; que todo elemento que se aplique en exceso tenderá a ser subutilizado o desperdiciado, liberando los excesos al ambiente circundante.

El fertirriego permite hacer un aprovechamiento más eficiente del agua y nutrientes, incrementando la productividad sustancialmente al comparar el fertirriego con la fertilización tradicional (Malash *et al.*, 2008; Badr *et al.*, 2010).

2.2.5.2. Riego por multicompuerta

Smith *et al.* (1986) describen el riego por multicompuertas como aquel que se realiza a con un tubo que cuenta con una serie de orificios con una separación constante a través de los cuales fluye el agua hacia el terreno en sistemas de riego por gravedad. Estos tubos pueden ser rígidos o flexibles (Koech *et al.*, 2013); fabricados de aluminio o PVC (El-Shafie *et al.*, 2017) y tener aditamentos que regulen el flujo de salida de los orificios, como multicompuertas u orificios con aditamentos autocompensantes de presión (Dasilva *et al.*, 1982; Hussein *et al.*, 2016), aunque Smith, Watts *et al.* (1986) sólo los definen en términos de los orificios por los que el agua sale y de diámetros variables desde 200 hasta 444 mm (Kincaid y Kemper, 1982; y Koech *et al.*, 2015). El flujo en los orificios de los tubos es dependiente de la carga de presión en cada uno de ellos por lo que, a mayor carga, mayor presión y a su vez, de la pendiente a lo largo de la tubería (Silva *et al.*, 1982)

A continuación se analiza la investigación en riego por multicompuerta desde los contextos de análisis numérico y simulación, diseño y mejoras de aditamentos, y evaluación de su efecto en cultivos.

2.2.5.3. Análisis numérico y simulación

Desde las primeras referencias del estudio del riego por multicompuerta se ha abordado desde el punto de vista del análisis mediante modelos matemáticos basados en la ecuación de continuidad y realizando análisis numéricos para casos especiales (Chu y Moe, 1971), lo cual ha servido para su posterior aplicación con diferentes variables, como la pendiente, gasto, separación de orificios, carga de presión. (Watts *et al.*, 1985), hacen uso del modelaje y simulación. Smith *et al.* (1986) desarrollaron uno de los primeros

modelos de simulación en computadora. Estos modelos fueron hechos en condiciones de tuberías rígidas. El problema del análisis y diseño en tuberías flexibles es abordado por (Koech, Smith *et al.*, 2013; Koech, Mossad *et al.*, 2015), los cuales presentan variabilidad en el área transversal a medida que se alcanza el flujo operacional, además de ser más comúnmente usados con tuberías de diámetros 222.8 mm y superiores. Por su parte El-Shafie *et al.* (2017 y 2018) evaluaron diferentes variables en el diseño de sistemas de riego por multicompuerta utilizando los modelos SALTMED y GPIMOD, respectivamente.

2.2.5.4. Diseño y mejora de aditamentos

El uso de los sistemas de riego por multicompuerta ha estado limitado por el supuesto de baja eficiencia, misma que se puede mejorar a través del uso de aditamentos como mini compuertas, y orificios autocompensantes. Como se comentó anteriormente, se ha diseñado herramientas que permiten medir y ajustar el flujo de las compuertas orificio por orificio de manera más rápida y eficientemente (Regier, 1981). Otros estudios han sido para el diseño de aditamentos autocompensantes del flujo en los orificios, mismos que permiten uniformizar el flujo en cada orificio (Hussein *et al.*, 2016). Este último aditamento ha mostrado incrementar indicadores de productividad. Para condiciones de diferencias de carga de presión más pronunciadas se desarrolló el método de “*cablegation*⁷”, que consiste en un tapón que es móvil a lo largo del tubo y limita el flujo a unos cuantos agujeros regulando su flujo a lo largo de la pendiente y el cual es sostenido y movido a través de un cable insertado en el interior del tubo (Kincaid y Kemper, 1982).

2.2.5.5. Efecto en los cultivos

El-Shafie *et al.* (2017 y 2018) hacen referencia a la evaluación de diferentes variables del riego por multicompuerta en el cultivo de papa. Sin embargo, en la mayoría de los

⁷Aparentemente un término surgido de la combinación de cable e irrigación. De una manera burda la traducción sería “cablegación”.

artículos hacen referencia a que, mejorando la uniformidad, se mejora el desempeño de los cultivos, ya que se da por sentado que, a través de una adecuada distribución de agua, se obtiene también una mejor distribución de nutrientes y un mayor rendimiento (Zerihun *et al.*, 2005).

Para un adecuado funcionamiento de estos sistemas, es necesario tener flujos lo más uniformes posibles a lo largo del tubo, por lo que en principio se colocaron pequeñas compuertas, con las cuales se regulaban su flujo abriéndolas o cerrándolas, esto requería que cada orificio se le midiera el flujo y posteriormente se ajustara, esto suele ser un proceso largo por lo que se diseñaron herramientas y técnicas para facilitar esta medición como la propuesta de Regier (1981). Otro modelo, que funciona de forma similar a las compuertas es el propuesto por Silva *et al.* (1982), sin embargo, estos presentan los mismos problemas de ajuste que las compuertas. Hussein *et al.* (2016) por su parte proponen un modelo de orificio autocompensante con la cual se han logrado incrementar la uniformidad de la descarga por lo que se incrementa la eficiencia del agua (El-Shafie *et al.*, 2017)

En el contexto del fertirriego, no se ubicó algún trabajo que investigara sobre el uso riego por multicompuertas en sistemas de fertirrigación, solo la propuesta de García-Saldaña *et al.* (2019). Sin embargo, este es apenas un avance, y del que aún falta realizar más investigación.

2.2.5.6. Fertirriego superficial por multicompuerta

A nivel mundial, los sistemas superficiales son utilizados en el 85 % de las tierras bajo riego (Lehrsch *et al.*, 2014). En México, Varela *et al.* (2011) mencionan que para 2008, el 90 % de 6.5 millones de hectáreas irrigadas se encontraban bajo sistemas de riego superficial. En combinación incrementan su eficiencia al reducir las pérdidas por infiltración en su movimiento por los canales de distribución.

De acuerdo con Ebrahimian *et al.* (2014) investigación sobre fertirriego superficial se ha llevado a cabo principalmente en condiciones en las que suelen hacer validaciones con datos de campo, pero en situaciones sin cultivo, en solo un evento de riego y/o utilizando fertilizantes o un sustituto del mismo (Abbasi F. *et al.*, 2003; Ravikumar *et al.*, 2011; Abbasi Y. *et al.*, 2012; Moravejalahkami *et al.*, 2012; Ebrahimian *et al.*, 2013; Abdel Wahab, 2014; Zerihun *et al.*, 2014; Šimůnek *et al.*, 2016; Brunetti *et al.*, 2018). Debido a la relativa facilidad con la que se puede modelar el fenómeno de distribución y dispersión de solutos en el suelo, considerando algunos parámetros (por ejemplo infiltración básica, pendiente, curvas de avance y recesión, y gasto) se tiene acceso a diferentes software para modelación de la distribución de fertilizantes en fertirriego superficial, como por ejemplo Hydrus (Šimůnek *et al.*, 2016; Karandish y Šimůnek, 2017; Kadyampakeni *et al.*, 2018), WinSRFR (Bautista *et al.*, 2009) y SURCOS (Burguete *et al.*, 2014). Estos software se han utilizado para la simulación de situaciones específicas con los que es posible modelar, la uniformidad de la distribución a lo largo de surcos y en el perfil del suelo, de agua y solutos, eficiencia del uso del agua, e incluso rendimientos (Simunek *et al.*, 2016); y cuyos resultados se aproximan a los reales cuando son ajustados correctamente; permitiendo evaluar manejos antes de llevarlos a campo.

El fertirriego superficial y su efecto en el cultivo en campo y en ciclos completos ha sido abordado por Janat (2007), Antille (2018) y Mohammadi *et al.* (2019), muestran el efecto del fertirriego superficial en índices de desempeño como el rendimiento y la eficiencia en el uso de agua. En caña de azúcar solo se logró ubicar el trabajo de Abdel Wahab (2014) y (Abbasi *et al.*, 2015) en el que evaluó tiempos de inyección y se midió el rendimiento, sus resultados indican que aplicando el fertirriego en todo el tiempo que dura el riego se obtienen el mayor rendimiento (46 t ha^{-1}) en comparación con la aplicación mecánica (36 t ha^{-1}), pero no midieron índices de distribución en el suelo que se consideran indicadores importantes. Esta investigación muestra que es posible maximizar el aprovechamiento de fertilizantes, como el nitrógeno, a través de su aplicación en fertirriego superficial (Cuadro 4).

Cuadro 4. Características de artículos sobre fertirriego superficial.

Referencia	VARIABLES	Indicadores	Cultivo	Resultados
Abbasi <i>et al.</i> (2003)	Profundidad del flujo (6, 10 y 14 cm) y duración de la inyección	Distribución de agua y soluto en el perfil de suelo	Sin cultivo	Fertirriego con una profundidad de flujo de 14 cm y aplicaciones cortas mejora la distribución de agua y solutos en el perfil
Abbasi <i>et al.</i> (2012),	Cantidad de agua (60, 68, 100 y 120 % del requerimiento) y Nitrato (60, 80 y 100 % del requerimiento) y tiempo de inyección.	Coefficiente de uniformidad de Christiansen, uniformidad de la distribución, pérdidas de nitrógeno y agua por escurrimiento.	Sin cultivo, aunque el título dice que fue en maíz, en el diseño experimental no se muestra.	Se redujeron las pérdidas del 31 al 25 % al reducir la cantidad de agua, y las pérdidas de nitrato se redujeron en un 7 al 4 %. Con la inyección en los últimos 20 minutos del corte fue con la que se obtuvieron los mayores índices.
Brunetti <i>et al.</i> (2018),	Distancia de surcos, precisión de la simulación (cada 10, 20 y 30 segundos y cada 2, 5 y 10 m de separación entre puntos de observación en el surco).	Profundidad alcanzada por el agua, concentración de solutos, tiempo de computo.	Simulado en Hydrus 2D y validado con WinSRFR y con datos de otros experimentos.	Se generó y probó un nuevo modelo para simular el movimiento de agua y solutos en el surco. Los resultados de simulaciones son satisfactorios.

Referencia	Variables	Indicadores	Cultivo	Resultados
Ebrahimian <i>et al.</i> (2013),	Riego en surcos alternados versus en surcos continuos.	Fracción percolada de agua,	Sin cultivo en campo.	Reducción de pérdidas de nitrato del 38.3 al 32 % de riego en surcos continuos respecto al riego en surcos alternados.
		eficiencia de aplicación de agua y pérdidas de agua nitrato por escurrimiento.		

Continuación del Cuadro 4. Características de artículos sobre fertirriego superficial.

Ebrahimian *et al.* (2014) hicieron una revisión en la que analizaron los sistemas de fertirriego superficiales desde dos categorías: 1) Experimentación en campo y modelaje, y 2) Consideraciones de manejo. Sin embargo, esta revisión se enfocó en el fertirriego desde el punto de vista del diseño hidráulico y simulaciones computacionales. En la presente investigación se considera medir el impacto del fertirriego desde el punto de vista ambiental y agronómico (Cuadro 5).

Cuadro 5. Categorías de análisis y su descripción del fertirriego superficial.

Categoría	Niveles	Descripción
Experimentación y diseño	Experimentación de campo y modelaje.	Experimentos en los que se elaboran recomendaciones de manejo con la finalidad de incrementar la eficiencia o uniformidad de aplicación de fertilizantes o que se realizan para coleccionar datos para la calibración y validación de modelos matemáticos.
	Consideraciones de diseño.	Evalúan factores clave y estrategias para mejorar la fertirrigación.
Impactos de la fertirrigación	Económicos	Miden el impacto económico de los sistemas de riego superficial.

Categoría	Niveles	Descripción
	Ambientales	Miden el impacto de los sistemas de riego superficial, ya sea beneficio o en detrimento de los ecosistemas.
	Agronómicos-productivos	Cuantifican el desarrollo de cultivos y miden indicadores como producción, rendimiento, eficiencia de uso de fertilizantes y agua.

Continuación del Cuadro 5. Categorías de análisis y su descripción del fertirriego superficial.

2.2.5.7. Experimentación y diseño

Experimentación en campo y modelaje. Los experimentos en la evaluación del riego también han sido más desarrollados en fertirriego en sistemas presurizados (Chen *et al.*, 2012). Los sistemas de riego superficial son definidos como difíciles de manejar a través de experimentos debido al tamaño de las unidades experimentales. En la revisión hecha por (Ebrahimian *et al.*, 2014) indican que no se han presentado experimentos en fertirriego superficial que permitan el análisis de varianza de los tratamientos aplicados. Sin embargo, y a pesar de esta dificultad, se han llevado experimentos de fertirriego superficial evaluando, por un lado, solo variables de movimiento y distribución de agua y fertilizantes a lo largo del surco (Abbasi Y. *et al.*, 2012; Bai *et al.*, 2013; Simunek *et al.*, 2016). Desde el 2014 se han publicado artículos sobre fertirriego superficial en los que han utilizado diseños experimentales. Si bien estos aún pueden presentar problemas por el tamaño de las unidades experimentales, la creatividad de los investigadores ha permitido que se puedan llevar a cabo. Ejemplo de ellos son las investigaciones en la que evalúan variables agronómicas, como: eficiencia en el aprovechamiento de fertilizantes, eficiencia en el uso del agua, rendimiento y producción de biomasa en papa, realizadas por Akhtar *et al.* (2016), Shahrokhnia y Sepaskhah (2016), Barideh *et al.* (2018), Antille (2018) y Mohammadi *et al.* (2019).

Para evaluar la fertirrigación superficial es necesario poder obtener datos de distribución de agua y fertilizante en el suelo, y de variables agronómicas y productivas, esto sería combinando características de los métodos de los autores antes mencionados. Las

unidades experimentales en este sentido suelen ser de al menos 5 surcos y dentro de cada unidad experimental, tener puntos de muestreo, usualmente, cada 20 metros y procurando tener al menos cuatro puntos de muestreo a lo largo del surco. Cada punto de muestreo serviría para la determinación de la uniformidad de distribución y del coeficiente de distribución de Christiansen, la suficiencia de la fertilización y la eficiencia de aplicación (Zerihun *et al.*, 2003), estos son índices de desempeño de la fertirrigación. Por otro lado, la fertirrigación para ser evaluada en términos de productividad es necesario tomar datos como producción total, producción de interés, masa de fertilizante o nutriente extraído.

Los tratamientos han sido generados a través diseños experimentales factoriales. Por ejemplo, Bai *et al.* (2013) investigaron el efecto de los factores flujo de entrada al surco (3 y 6 L s⁻¹) y tipo de fertilización (convencional y fertirrigación) obteniendo con esto un total de 4 tratamientos que multiplicado por tres repeticiones arrojó un total de 12 unidades experimentales, la cual consistió en melgas de 92 m de largo por 2 de ancho en una superficie de $92 \times 2 \times 12 = 2208 \text{ m}^2$. Mohammadi *et al.* (2019) investigó tres factores, dos con dos niveles (2²) y uno con cuatro, que en total representaron 16 tratamientos y tres repeticiones para un total de 48 unidades experimentales. El fertirriego como tal no fue evaluado con diferentes niveles, sino que fue un nivel dentro de un factor llamado técnica de aplicación. La distribución de las unidades experimentales en ambos casos fue en parcelas divididas de tal manera que tratamientos con la misma cantidad de agua estuvieran juntas.

Consideraciones de diseño. Sin dejar la consideración de que el diseño en sí de los sistemas de riego superficial, y sus variables se tiene que distinguir estos de las variables de producción como son el rendimiento, eficiencia de uso de agua y fertilizantes, producción de biomasa y absorción de nutrientes, característicos de la agronomía. Estos factores suelen ser poco evaluados en el diseño de los sistemas de riego centrándose más en el desempeño hidráulico. Sin embargo, a pesar de que el primer artículo encontrado sobre fertirrigación se centraba en la modelación, el segundo artículo trataba de un experimento de campo realizado por Schepers *et al.* (1995), a partir de entonces

la investigación en fertirriego se ha enfatizado en modelación, principalmente por el incremento de los recursos computacionales disponibles y del costo de los experimentos (Ebrahimian *et al.*, 2014).

Los objetivos del fertirriego superficial es incrementar la eficiencia de aplicación, absorción de nutrientes y la reducción de pérdidas (Mohammadi *et al.*, 2019). Este último objetivo tiene que ver con la economía de las unidades de producción. Los datos arrojados sobre el impacto de la fertirrigación superficial sugieren que estos siguen siendo menos eficientes que los sistemas presurizados, pero su implementación es más económica, y, por lo tanto, más extendidos. Como ya se ha mencionado, a la fecha se tienen pocos datos sobre el impacto económico de los sistemas de fertirriego superficial.

2.2.5.8. Impacto de la fertirrigación superficial

El impacto de la fertirrigación superficial ha sido evaluado principalmente en términos agronómicos y ambientales. Sin embargo, en cuanto a la búsqueda, no se encontró un documento que evalúe el impacto económico de la fertirrigación superficial. Al ser del ámbito agrícola, la fertirrigación se evalúa principalmente en términos agronómicos, ya sea en evaluaciones de campo o en modelaje. Sin embargo la investigación en modelaje se realiza principalmente con factores del diseño de los sistemas, como son gasto, pendiente, longitud de surcos, concentración de solutos, flujo de entrada y de salida; y los datos obtenidos son la dispersión del agua y fertilizantes a lo largo y en lo profundo del área evaluada, el comportamiento de los flujos bajo diferentes configuraciones de las variables antes mencionadas, e índices de eficiencia como uniformidad de la distribución, coeficiente de uniformidad del cuarto más bajo⁸.

⁸Se define más adelante

Cuadro 6. Características de artículos sobre fertirrigación en caña de azúcar.

Fuente	Tipo de investigación.	Tipo de sistema de riego	Variables evaluadas	Variables medidas	Recomendación
Abdel Wahab (2014)	De campo	Superficial	Tiempos de inyección y comparado con aplicación mecánica de fertilizantes	Rendimiento, altura y diámetro de tallo	Aplicar el fertirriego durante todo el tiempo de riego
Barbosa <i>et al.</i> (2017)	En campo	Presurizado	Tipo de agua (tratada, limpia y mezclada) y suplemento con fertilizante	Huella de agua, rendimiento o estimado	El mayor rendimiento se logra con el uso de agua tratada sin suplemento fertilizante.
Chen <i>et al.</i> (2012)	En campo	Goteo	Fertirrigación, fertilización convencional sin riego por goteo, fertilización convencional y riego por goteo, solo riego por goteo.	Variables agrónomas, económicas y productivas	El tratamiento más productivo fue el fertirrigación, pero el más rentable económicamente fue solo riego por goteo.
Ng Kee Kwong <i>et al.</i> (1999)	En campo	Goteo	Cuatro niveles de dosis de nitrógeno (0, 40, 80, 120 y 160 kg N ha ⁻¹), comparado con fertilización tradicional y no fertilización	Recuperación de nitrógeno, Rendimiento, producción de azúcar.	El mayor rendimiento y producción de azúcar se obtuvo con fertirriego en dosis de 80 kg N ha ⁻¹ , el mayor porcentaje de

Fuente	Tipo de investigación.	Tipo de sistema de riego	VARIABLES evaluadas	VARIABLES medidas	Recomendación
					recuperación de nitrógeno fue de 47 % en la dosis de 80 kg N ha ⁻¹ .
Santos <i>et al.</i> (2016)	Simulación	Goteo	Dos profundidades de colocación de emisores (0.2 y 0.4 m) y calidad de agua (tratada y limpia)	VARIABLES de contenido y retención de agua en el suelo	La mayor capacidad de retención de humedad se observó a 0.2 m de profundidad de emisores, no se observó impacto de la 7calidad del agua en la8 retención de hu9medad
Sathiyar <i>et al.</i> Priya (2017)	De campo	Goteo	Dosis de fertilización (75 y 100 % de la dosis recomendada), fuente de fertilizantes (100 comercial, 50 % comercial y 50 % soluble, 100 % soluble y humedad con respecto a Etc.	Eficiencia de uso de agua, productividad del agua, y rendimiento de azúcar	El rendimiento (280 t ha ⁻¹) se alcanza utilizando solo fertilizante soluble, al 100 % de la dosis recomendada y 125 % de Etc. ¹⁰

⁹ Continuación del Cuadro 6. Características de artículos sobre fertirrigación en caña de azúcar.

¹⁰ Evapotranspiración del cultivo

Fuente	Tipo de investigación.	Tipo de sistema de riego	VARIABLES evaluadas	VARIABLES medidas	Recomendación
Ravikumar <i>et al.</i> (2011)	Simulación y de campo	Simulación	Comportamiento de diferentes calendarios de riego	Flujos y acumulación de urea, nitratos y amonio en el suelo y raíces.	Se estima un ahorro en el 30 % de fertilizantes por la adecuada calendarización obtenida con la simulación.
Abbasi <i>et al.</i> (2015)	Campo	Gravedad	Dosis de nitrógeno y fraccionamientos de la fertilización.	Altura, rendimiento, % de sacarosa, Eficiencia de uso de agua, eficiencia de y uso de fertilizante, pureza, °Brix, Rendimiento de azúcar,	Efecto significativo de fraccionamientos de la fertilización, pero no hubo diferencia en las dosis de nitrógeno.

Continuación del Cuadro 6. Características de artículos sobre fertirrigación en caña de azúcar.

2.2.6. Fertirrigación en caña de azúcar

En el Cuadro 6 se resume la información obtenida de referencias bibliográficas que reportan estudios sobre fertirriego en caña de azúcar la cual se analiza a continuación.

El fertirriego en caña de azúcar se ha investigado en sistemas de riego presurizado (Ng Kee Kwong *et al.*, 1999; Chen *et al.*, 2012; Shekinah *et al.*, 2012; Kaushal *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2016; Barbosa *et al.*, 2017; y Sathiyaraj y Priya, 2017), y sistemas superficiales (Ravikumar *et al.*, 2011; Abdel Wahab, 2014; Abbasi *et al.*, 2015).

Con la fertirrigación se logran incrementos en el rendimiento, eficiencia de los fertilizantes y eficiencia del riego. Destacan los trabajos de Chen *et al.* (2012) donde encontraron que con el cambio de fertilización convencional a fertirriego se logra un incremento de 8 t ha⁻¹, y de 20 t ha⁻¹ cuando el cambio es desde el “no fertilizado” a “fertirrigación”; mientras pasar del “sin riego por goteo”¹¹ al riego por goteo represento un incremento de 20 t ha⁻¹. Por otro lado Ng Kee Kwong *et al.* (1999) evaluaron cuatro niveles de nitrógeno en fertirriego (40, 80 120 y 160 kg N ha⁻¹) y lo comparo con 0 y 120 kg N ha⁻¹. Sus resultados arrojaron que el tratamiento con 120 kg N ha⁻¹ enterrado fue similar al de 80 kg N ha⁻¹. Por su parte Santos *et al.* (2016), midieron la retención de humedad en un suelo cultivado con caña de azúcar, sin embargo sus resultados solo expresaron la capacidad de retención de agua en el suelo en función de dos profundidades a las que se enterraron la cinta de riego y el uso de agua limpia y agua residual. Por su parte, fertirriego en caña de azúcar en sistemas superficiales se ha estudiado mediante simulaciones computarizadas y modelos matemáticos, como se verá más adelante, las simulaciones son una técnica común en el estudio de sistemas de riego superficial.

Los ejemplos anteriores son representativos para caña de azúcar. Sin embargo, estos sistemas son comunes en otros cultivos como en jitomate (Shahrokhnia y Sepaskhah, 2016; Luo y Li, 2018), maíz (Kang *et al.*, 2018; Wang D. *et al.*, 2018; Mohammadi *et al.*, 2019), y algodón (Antille, 2018; Wang H. *et al.*, 2018) entre otros.

2.2.7. Técnicas de inyección de fertilizantes

Uno de los componentes básicos en los sistemas de fertirriego es el dispositivo inyector. Para la inyección de fertilizantes en fertirriego presurizado Li *et al.* (2006) mencionan que se puede hacer con dispositivos tales como tanques de presión diferencial, bombas

¹¹No especifica si se regó con alguna otra técnica ó fue de temporal.

proporcionales de pistón accionado por agua, bombas de desplazamiento positivo y dispositivos de principio Venturi. Para el caso de la inyección de fertilizantes en fertirriego superficial, en la literatura se ha encontrado que se utilizan básicamente dos dispositivos: en el primero el fertilizante disuelto es vertido en el surco o tubería distribuidora de manera controlada mediante el uso de una bomba (Sabillón y Merkley, 2004; Bai *et al.*, 2013; Antille, 2018); en el segundo el fertilizante líquido baja por gravedad desde un par de tanques interconectados, el primero es reservorio y el segundo sirve como control del flujo mediante un flotador que mantiene la carga constante (Abbasi *et al.*, 2012). Un tercer tipo de dispositivo de inyección para fertirriego es el que García-Saldaña *et al.* (2019) propone; un dispositivo tipo Venturi acoplado a la tubería de distribución vertido, en el surco o melga, a través de tubería multicompuerta.

2.2.8. Evaluación de la fertirrigación

La fertirrigación se puede evaluar mediante diferentes índices, a continuación, se discuten algunas técnicas e índices de evaluación de la fertirrigación.

2.2.8.1. Eficiencia de aplicación

La eficiencia de aplicación se define como la relación de masa efectiva de fertilizante nitrogenado con respecto a la masa del nitrógeno que entró en el surco (Zerihun *et al.*, 2003). Se define por la Ecuación (1):

$$E_{aN} = \frac{\sum_{j=1}^J M_{EN}^j}{\int_{t_{aoN}}^{t_{roN}} Q_0(t) N_{OC}(t) dt} \times 100 \quad (1)$$

Donde j representa a cada uno de los puntos de muestreo, M_{EN}^j es la masa de fertilizante efectivo en los j -ésimos puntos consecutivos en el canal o surco (mg kg^{-1}); t_{aoN} es el tiempo medido a partir del inicio del riego al que el fertilizante es detectado por primera vez al final del canal (segundos); t_{roN} el tiempo a partir del inicio del riego en que la

concentración de fertilizante es cero al final del surco (segundos); Q_0 es el gasto de entrada al surco ($m^3 s^{-1}$); N_{oc} es la concentración del fertilizante en el agua al inicio del surco ($mg L^{-1}$). La E_{aN} es expresada en porciento.

2.2.8.2. Suficiencia

En este caso (Zerihun *et al.*, 2003) proponen usar el índice requerimiento de nitrógeno (I_{rN}) como indicador de una adecuada fertirrigación (%). Este índice se define como la relación entre el nitrógeno distribuido a lo largo de la zona de raíces con respecto al requerimiento por parte del cultivo. Matemáticamente se define con la Ecuación (2).

$$I_{rN} = \frac{\sum_{j=1}^J M_{EN}^j}{N_r L} \times 100 \quad (2)$$

Donde M_{EN}^j es la masa de fertilizante efectivo en el j-ésimo segmento del canal o surco ($mg kg^{-1}$); N_r es el requerimiento de fertilizante ($kg ha^{-1}$) y L es la longitud del surco (m). Este indicador, como ahonda el autor, es variable espacialmente, por lo que hace necesario la introducción de un tercer término, la uniformidad.

2.2.8.3. Uniformidad

La uniformidad espacial de la fertirrigación en la zona de raíces es un indicador de que tan bien el I_{rN} es representativo de la medida de la suficiencia a lo largo de la profundidad de raíces. Esta puede ser evaluada a través del coeficiente de uniformidad de Christiansen (UCCN, Ecuación (4) y la uniformidad de la distribución ($UD_{\%}$, Ecuación (3) a lo largo del surco. Estas medidas pueden estimarse a partir de valores de contenido de nitrógeno en diferentes puntos a lo largo del canal a una profundidad específica.

$$UD_{1/4} = \frac{N_{avf}}{N_{av}} = \frac{N_{avf}L}{\int_0^L N dx} \quad (3)$$

$$UCC_N = 1 - \sum_{k=1}^n \left| \frac{N_k}{\sum_{k=1}^n N_k} - \frac{1}{n} \right| \quad (4)$$

Donde N_{avf} es el contenido de nitrógeno en los puntos de muestreo del 25 % más bajo de la muestra total (mg kg^{-1}). N_{av} es el promedio de los valores de contenido de nitrógeno de todos puntos de muestreo a lo largo del surco (adimensional); N es la cantidad de fertilizante almacenado en una capa de suelo de profundidad específica en un punto determinado a lo largo del surco (mg kg^{-1}); N_k , cantidad de nitrógeno almacenado en el suelo en un punto k (mg kg^{-1}); n , número de puntos utilizados para el cálculo del coeficiente de uniformidad de Christiansen (adimensional).

2.2.8.4. Eficiencia de fertilización

La eficiencia de fertilizantes es la relación entre la cantidad de nutriente aprovechado por cada unidad de nutriente aplicado. Es uno más de los destinos que puede tener el nutriente, en forma de fertilizante, dentro del sistema productivo, los otros son las pérdidas y el aprovechamiento que puedan hacer microorganismos en el suelo (Salgado-García *et al.*, 2001).

Este indicador es muy importante desde el punto de vista económico y ambiental, ya que permite evaluar las prácticas encaminadas a disminuir las pérdidas; así como de generar recomendaciones de fertilización con base en un esquema metódico. Los beneficios de reducir las pérdidas son: disminuir los costos de producción, reducir la contaminación de aguas subterráneas por la lixiviación y escurrimiento y la volatilización en forma de gases de efecto invernadero todo esto manteniendo la rentabilidad de los sistemas (Flores *et al.*, 2002; González-Torres *et al.*, 2016).

La eficiencia del uso de nitrógeno como fertilizantes, así como para cualquier nutriente, se puede medir a través de dos tipos de métodos: 1. Métodos de diferencia y 2. El método de dilución de isótopos (Harmsen y Moraghan, 1988), en este último se utiliza el marcaje con isótopos del nutriente de interés.

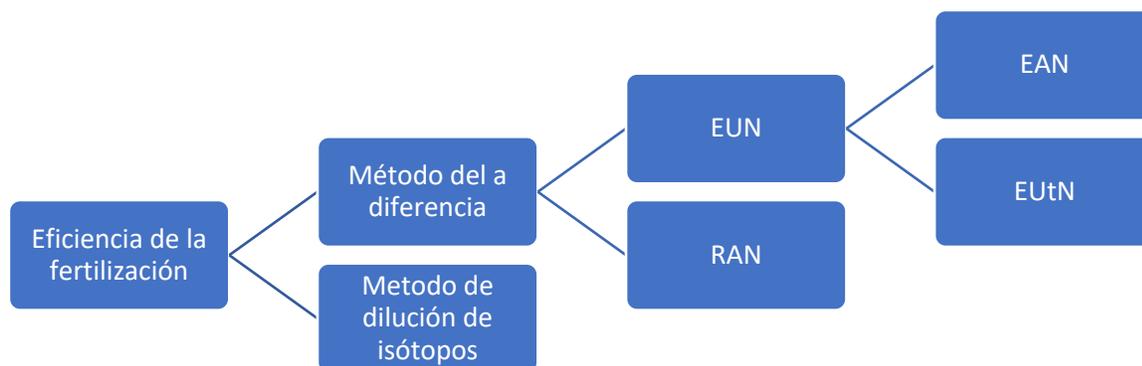


Figura 4. Relación entre los métodos para medir la eficiencia del nitrógeno y diferentes indicadores.

En el método de la diferencia se usa la fracción de recuperación aparente como índice de eficiencia, mientras que para el método isotópico se utiliza la fracción de recuperación del isótopo de interés (Zemenchik y Albrecht, 2002).

2.2.8.5. Eficiencia de uso del nitrógeno

Moll *et al.* (1982) definen la eficiencia de uso de nitrógeno (EUN) como la cantidad de grano o producto cosechado por unidad de nitrógeno disponible en el suelo, el cual considera el nitrógeno que se aplica como fertilizante y el que ya está presente en él. La EUN se compone a su vez de dos indicadores: eficiencia de absorción de nitrógeno (EAN) y la eficiencia de utilización del nitrógeno (EUtN). La EAN es la cantidad de nitrógeno que entra en la planta, mientras que la EUtN es la relación entre el producto de interés y el nitrógeno que entra a la planta, definido como la cantidad de nitrógeno

utilizado por el producto de interés. Estos indicadores están definidos por las Ecuaciones (5), (6) y (7).

$$EUN = \frac{G_w}{N_s} \quad (5)$$

$$EaN = \frac{N_t}{N_s} \quad (6)$$

$$EUtN = \frac{G_w}{N_t} \quad (7)$$

Donde N_t es el nitrógeno total en la planta en la etapa de madurez (g t^{-1}), N_s es la dosis de nitrógeno (kg ha^{-1}), G_w es el peso del grano (o producto de interés, toneladas).

La EUN, EAN y la EUtN han sido utilizados en trigo (Zhang *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2018), caña de azúcar (Otto *et al.*, 2016), pastos (Zemenchik y Albrecht, 2002), maíz (Zhu *et al.*, 2016). Los índices se expresan en fracciones de la unidad.

La recuperación aparente de nitrógeno extraído por el cultivo por cada unidad de nitrógeno aplicado se estima mediante la siguiente ecuación:

$$RAN = \frac{NET_i - NET_0}{DN} \times 100 \quad (8)$$

Dónde: RAN = recuperación aparente de nitrógeno (%), NET_i = nitrógeno extraído por la planta en el i -ésimo tratamiento fertilizado (kg ha^{-1}), NET_0 = nitrógeno extraído por la planta en el tratamiento sin nitrógeno (kg ha^{-1}) y DN = dosis de nitrógeno del tratamiento fertilizado (kg ha^{-1}).

El segundo método, el de dilución de isótopos, se mide la fracción de isótopos de ^{15}N recuperados (^{15}NRF) de tratamientos fertilizados; se estima con la siguiente ecuación (Harmsen y Moraghan, 1988):

$${}^{15}\text{NRF} = \frac{y_{xp} \text{ NP}}{y_{xf} \text{ NF}} \quad (9)$$

Donde y_{xp} y y_{xf} son los porcentajes de ${}^{15}\text{N}$ marcado en el cultivo y en el fertilizante aplicado respectivamente, y NP y NF son las cantidades de fertilizante nitrogenado aplicados en cada tratamiento (kg ha^{-1}), estos fertilizantes nitrogenados son previamente enriquecidos con cantidades conocidas del isótopo ${}^{15}\text{N}$.

Franco *et al.* (2006) toman en cuenta además la abundancia natural del isótopo ${}^{15}\text{N}$ en el suelo y plantas, proponiendo la como indicador al nitrógeno proveniente de fertilizante (NPDF) definido por la Ecuación (10), (11) y (12)

$$\text{NPDF}(\%) = \left[\frac{a - b}{c - b} \right] \times 100 \quad (10)$$

$$\text{NPDF}_{\text{CR}}(\text{kg ha}^{-1}\text{N}) = \left(\frac{\text{NPDF}_{\text{CR}}\%}{100} \right) \times N \text{ total} \quad (11)$$

$$\text{NPDF}_{\text{AR}}(\text{kg ha}^{-1}\text{N}) = 2 \times \left(\frac{\text{NPDF}_{\text{CR}}\%}{100} \right) \times N \text{ total} \quad (12)$$

$$\text{NPDF}_t(\text{kg ha}^{-1}\text{N}) = \text{NPDF}_{\text{AR}} + \text{NPDF}_{\text{CR}} \quad (13)$$

Donde “a” es la abundancia de átomos de ${}^{15}\text{N}$ en la muestra (%), “b” es la abundancia de ${}^{15}\text{N}$ en el fertilizante, “c” es la abundancia natural de átomos de ${}^{15}\text{N}$ (0.366%), N total es el nitrógeno total en la biomasa superficial (kg ha^{-1}), AR y CR son los valores promedio de los surcos adyacentes y el surco central tratado con urea marcada con ${}^{15}\text{N}$, respectivamente. Este índice ha sido utilizado para medir la eficiencia de recuperación del nitrógeno proveniente del fertilizante en caña de azúcar (Flores *et al.*, 2002; Franco *et al.*, 2011; Boschiero *et al.*, 2018).

El método de la diferencia y el método isotópico arrojan resultados diferentes en la eficiencia de uso de nitrógeno (Salgado García *et al.*, 2001; Boschiero *et al.*, 2018).

Aunque se considera más preciso el método isotópico (Harmsen y Moraghan, 1988; Zemenchik y Albrecht, 2002). El método de la diferencia suele sobreestimar la fracción de nitrógeno recuperado, especialmente a dosis bajas de fertilización (Harmsen y Moraghan, 1988) comparadas con el método isotópico.

2.2.8.6. Pérdida de fertilizantes

La pérdida de fertilizantes en cultivos en campo es un problema común que afecta la eficiencia y productividad agrícola. Los fertilizantes son esenciales para suministrar los nutrientes necesarios para el crecimiento y desarrollo de las plantas, sin embargo, debido a diversos factores como la lixiviación, la volatilización y la fijación, una gran cantidad de fertilizantes se pierden antes de ser absorbidos por las raíces de las plantas. Esta pérdida no solo representa una pérdida económica para los agricultores, sino que también puede tener un impacto ambiental negativo al contaminar fuentes de agua subterránea y liberar gases de efecto invernadero a la atmósfera.

Escurrecimiento superficial. Adviento-Borbe *et al.* (2018), reportan que las pérdidas de fertilizante a través del agua de riego pueden llegar a ser de entre 0.162-0.343 mg L⁻¹ de agua de riego medida en los escurrecimientos de sistemas de riego por surcos. Estas pérdidas llegan a representar el 66.57 % del fertilizante aplicado al sistema, dependiendo del régimen del flujo de entrada al surco (Moravejalahkami *et al.*, 2012), con comparación con recuperación aparente de nitrógeno alcanza apenas valores de 30 – 35 %.

Lixiviación. El nitrógeno lixiviado es la fracción del fertilizante aplicado que penetra en el suelo más allá del alcance de las raíces como parte de la fracción de agua percolada. Zerihun *et al.* (2003) proponen la Ecuación (14) para cuantificar esta fracción.

$$L_{fN} = \frac{\int_0^L (N - N_{rZ}) dx}{\int_{t_{aoN}}^{t_{roN}} Q_0(t) N_{OC}(t) dx} \times 100 \quad (14)$$

Donde N_{rZ} , cantidad de nitrógeno almacenado en el suelo a lo largo de la profundidad de raíces durante un evento de fertirriego, (g m^{-1}); L_{rN} es la fracción de nitrógeno lixiviada, N , cantidad de nitrógeno almacenado en un horizonte de suelo de profundidad específica a una distancia L ; t_{a0N} es el tiempo, medido desde el inicio del riego, en el que se detecta el nitrógeno por primera vez en la corriente en la entrada del surco (min); t_{roN} , es el tiempo, medido desde el inicio del riego, al cual la concentración de nitrógeno cae a cero en la corriente en la entrada del surco (min); Q_0 , gasto de entrada (L min^{-1}); N_{oc} , concentración de nitrógeno en la entrada del surco (g L^{-1}).

2.2.8.7. Huella hídrica

La huella hídrica de un producto es un indicador de la cantidad de agua utilizada en la producción de algún producto medido a lo largo de toda la cadena. Tanto para la definición como para los procedimientos utilizados para la medición de huella hídrica, se toman de los trabajos realizados por Hoekstra *et al.* (2011). En el caso de la producción agrícola, es una medida de la cantidad de agua consumida para la producción una cantidad unitaria de algún producto agrícola. Esta medida hace la distinción de tres tipos de agua consumida en la producción: agua azul, verde y gris. El agua azul corresponde al agua consumida en el proceso de producción que proviene de fuentes de agua superficial y subsuperficial, como pozos, ríos y embalses. El agua verde corresponde al agua proveniente de la precipitación, que es retenida en el perfil del suelo, que no escurre ni recarga los mantos acuíferos; y el agua gris corresponde al volumen de agua que es contaminada por las actividades relacionadas con la producción, por ejemplo, por agroquímicos. Dependiendo de la confiabilidad y segmentación de los datos, en la medida de lo posible se recomienda hacer la distinción entre la huella hídrica que cada tipo de agua: huella hídrica azul, huella hídrica verde, huella hídrica gris y huella hídrica total. La huella hídrica se calcula mediante la Fórmula (15).

$$HH_x = \frac{RAC_x}{R^*} \quad (15)$$

Donde HH_x es la huella hídrica ($m^3 \text{ ton}^{-1}$), x hace referencia al agua verde o azul; RAC es el requerimiento de agua del cultivo (m) y; R^* es el rendimiento del cultivo en (ton ha^{-1}).

Para el cálculo de los requerimientos de agua del cultivo de agua azul y verde, se utiliza la Fórmula (16)

$$RAC_x = 10 \times \sum_{d=1}^{dc} ET_{Cx} \quad (16)$$

Donde RAC_x es el requerimiento del agua del cultivo para el agua x ; x hace referencia al agua azul o verde, ET_{Cx} es el valor de evapotranspiración del cultivo proveniente del agua azul o verde; dc es el número de días considerado en el ciclo de cultivo (Hoekstra *et al.*, 2011; Liu y Song, 2020).

2.3. Planteamiento del problema de investigación

2.3.1. Situación problemática

La caña de azúcar es uno de los cultivos más extendidos en el estado de Veracruz. De acuerdo con datos del SIAP (2019), Veracruz es el principal estado productor de caña de azúcar a nivel nacional. La superficie sembrada en el estado es de 296 478 hectáreas, que representa casi el triple del segundo estado productor que es San Luis Potosí, con 100 213 ha. En el año 2019, la producción total de caña de azúcar alcanzó las 21 171 175 toneladas. El distrito de riego 035 La Antigua tiene una capacidad para distribuir agua de riego en 20 190 hectáreas de las cuales el 84.3 % corresponden a agroecosistemas con caña de azúcar, con un rendimiento promedio de 88.51 toneladas por hectárea, generando un valor total de producción de \$ 970 495 070.00. Este nivel de producción genera una amplia actividad y derrama económica, no solo por la producción de la azúcar, misma que es comercializada y exportada nacional e internacionalmente, sino que además genera valor por los servicios y labores que requiere en su producción.

En contraste con su importancia, la problemática de los agroecosistemas con caña de azúcar es diversa. Dicha problemática se analiza desde las perspectivas social, ambiental, económica, política y tecnológica, las cuales se resumen en la Figura 1. Muchas familias dependen, directa o indirectamente de la producción de esta gramínea, ya sea como mano de obra en las labores del cultivo, renta y operación de maquinaria, servicios de alimentación, mantenimiento, limpieza, etc. Los productores se organizan en ejidos, módulos de riego y grupos de corte. Cada grupo tiene sus propios fines y organización. Sin embargo, en estos grupos no están ajenos a problemas de corrupción, bajo nivel educativo y malos manejos. A pesar de la que en muchos casos la producción de caña de azúcar no se considera rentable los productores, se siguen dedicando a ella por mantener los beneficios de la seguridad social, como los servicios de salud, pagos de pensiones y el autoempleo que se genera. Además, de que es un cultivo que por ley está protegido, ya que brinda seguridad social al productor cañero, y eventualmente una pensión al momento de jubilarse.

Cuadro 7. Datos de ingresos estimados por producción de caña de azúcar a partir de datos de producción en el distrito 035 La Antigua.

Año	Sup. Cos. (miles ha)	Rend Ton ha ⁻¹	Producción ton	PMR \$/ton	VP \$	IB diario \$ día ⁻¹ ha ⁻¹	IN diario \$ día ⁻¹ ha ⁻¹	Var IN (%)
1998	16 703	115	1 913 229	251	480 853 915	78.87	33.67	
1999	16 293	108	1 755 593	238	417 101 305	70.14	29.94	-11.1
2000	15 656	111	1 740 408	294	512 041 293	89.60	38.25	27.8
2001	15 754	108	1 706 179	313	533 279 195	92.74	39.59	3.5
2002	17 050	108	1 848 804	301	556 106 830	89.36	38.14	-3.6
2003	16 165	108	1 749 533	326	570 167 217	96.63	41.25	8.1
2004	15 762	108	1 704 337	353	601 667 361	104.58	44.64	8.2
2005	16 993	108	1 839 092	357	656 555 844	105.85	45.18	1.2
2006	15 637	108	1 691 603	400	676 125 852	118.46	50.57	11.9
2007	17 034	104	1 774 937	402	714 188 308	114.87	49.03	-3.0

Año	Sup. Cos. (miles ha)	Rend Ton ha ⁻¹	Producción ton	PMR \$/ton	VP \$	IB diario \$ día ⁻¹ ha ⁻¹	IN diario \$ día ⁻¹ ha ⁻¹	Var IN (%)
2008	17 101	97	1 652 118	422	697 743 644	111.79	47.72	-2.7
2009	17 327	97	1 675 802	497	832 873 698	131.69	56.21	17.8
2010	16 348	97	1 580 461	619	978 497 860	163.98	70.00	24.5
2011	16 595	89	1 474 542	683	1 006 499 752	166.17	70.93	1.3
2012	18 916	96	1 814 756	695	1 260 971 551	182.63	77.96	9.9
2013	17 447	98	1 717 638	472	810 334 730	127.25	54.32	-30.3
2014	18 965	98	1 865 220	470	876 879 456	126.68	54.07	-0.4
2015	17 482	88	1 542 281	527	812 072 395	127.27	54.32	0.5
2016	17 035	89	1 507 768	644	970 495 066	156.09	66.63	22.6
2017	17 572	87	1 536 874	767	1 178 773 481	183.79	78.45	17.7
2018	18 454	95	1 751 362	804	1 407 615 107	208.98	89.20	13.7
2019	18 607	87	1 622 188	757	1 228 057 450	180.82	77.18	-13.5
2020	18 698	90	1 677 813	812	1 363 071 547	199.55	85.18	10.4

Continuación del Cuadro 7. Datos de ingresos estimados por producción de caña de azúcar a partir de datos de producción en el distrito 035 La Antigua.; Sup. Cos.: Superficie cosechada; Rend: Producción por hectárea; VP: Valor de la producción; IB: Ingreso bruto, IB = PMR x Rend; Var IN. Variación del ingreso neto diario con respecto al año anterior.

De acuerdo con datos presentados por Moreno-Seceña (2010) se estima que los productores de caña de azúcar obtienen entre un 40 y 44¹² %, respectivamente, de ingreso netos con respecto a los ingresos brutos de la producción caña de azúcar por hectárea. Los cuales para el 2020 representaba un valor de aproximadamente \$ 85.18 diarios por hectárea de caña cosechada. Este ingreso se ha incrementado en promedio 2.01 %¹³ anual desde el año 2010, valor que está por debajo de la inflación promedio reportada en México en el mismo periodo que fue en promedio 4.51 %¹⁴ anual (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2023). Dicho incremento se ha visto influido en

¹² 42.7 % promedio.

¹³ (IN diario de 2020 – IN diario de 2011) / IN diario de 2011

¹⁴ De enero de 2011 a diciembre de 2020 la tasa reportada es de 45.12 % el cual se promedió entre 10 años del periodo.

mayor proporción por un incremento constante en el precio medio rural de la caña de azúcar, más que por otros factores como el rendimiento por hectárea, o la superficie cosechada. (Cuadro 7). Esto indica que los ingresos por producción de caña de azúcar no se han incrementado a la par de la inflación, esto aún sin contar el incremento en los precios de los fertilizantes y combustibles. Para obtener un salario mínimo de \$123.22 vigente para enero de 2020 se requeriría cosechar al menos 1.47 hectáreas de caña de azúcar y, de acuerdo con la tendencia, se necesitarían 2.03 hectáreas para el 2023¹⁵ (Secretaría del Trabajo y Previsión Social, 2023).

Desde el punto de vista financiero, los principales problemas de la producción de caña de azúcar son los altos costos de producción y la falta de fuentes de financiamiento (SAGARPA, 2018). Los productores cañeros tienen pocas fuentes de financiamiento, usualmente son los propios ingenios y que suelen cobrar altas tasas de intereses, lo que dificulta la liquidación de las deudas adquiridas para financiar las labores de cultivo que se realizan año con año. Adicionalmente, los proveedores de insumos suelen financiar a los productores, pero los mismos inflan los costos a razón de mantener sus ganancias. Adicionalmente, los costos de producción de caña de azúcar varían de acuerdo con las condiciones económicas, sociales y agroecológicas (suelo, temperatura y precipitación) y a la tecnología empleada.

Por otro lado, la observación de las condiciones meteorológicas ha mostrado cambios en los niveles y patrones en que se presentan: la temperatura ambiental y la precipitación que puede afectar la producción de caña de azúcar. Los patrones de precipitación son más variables, ya que puede incrementar o disminuir, pero además se ha incrementado la intensidad de los eventos, y se han reducido las temporadas de lluvias o son muy erráticas. Las temperaturas promedio se han elevado provocando el incremento de la evapotranspiración y estrés hídrico, el cual puede afectar negativamente el desempeño de los agroecosistemas en términos del rendimiento agronómico del cultivo y por ende su rentabilidad (Liang *et al.*, 2020).

¹⁵ Considerando el notable incremento en los salarios mínimos en enero de 2023.

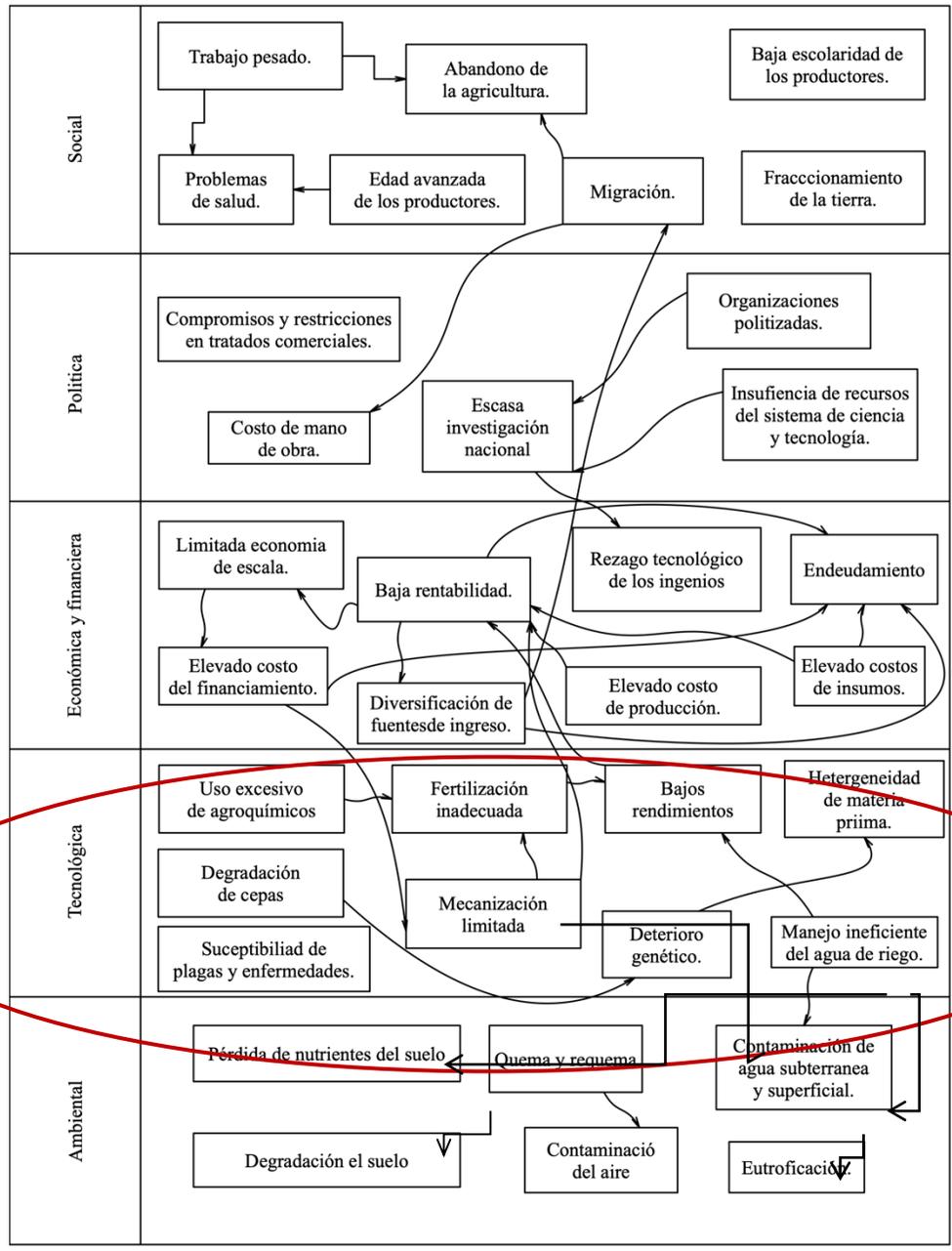


Figura 5. Problemática del agroecosistema con caña de azúcar.

El incremento de la evapotranspiración es indicador de que los requerimientos de agua también aumentarán, presionando los conflictos sobre los recursos hídricos. Otro problema importante en el agroecosistema con caña de azúcar es la contaminación ambiental. El extensivo uso de agroquímicos ha provocado contaminación ambiental por insecticidas, herbicidas y fertilizantes generando nitrificación, contaminación y eutrofización de cuerpos de agua. Otra fuente de contaminación son las partículas

suspendidas, liberadas en las chimeneas como producto de la quema de material vegetal en calderas en las fábricas e ingenios, y de la quema en las labores de cosecha. Este problema es especialmente importante en las poblaciones cercanas a las zonas productoras de caña de azúcar y a los ingenios (Castro-Gerardo *et al.*, 2020). A pesar de su importancia, los agroecosistemas con caña de azúcar presentan una serie de limitaciones tecnológicas que incide de manera negativa en su desempeño. Entre los problemas que se pueden mencionar el uso excesivo de agroquímicos, degradación de cepas, fertilización inadecuada, bajos rendimientos, heterogeneidad de materia prima, manejo inadecuado de agua, limitada mecanización, entre otras (Comité Nacional Para el Desarrollo Sustentable de la caña de Azúcar, 2018).

Las prácticas de fertilización nitrogenada en el campo cañero son usualmente inadecuadas; con dosis promedio de 250 kg ha⁻¹, la cual se suministra al cultivo en una o dos aplicaciones, en el 98 % de los casos. La baja eficiencia de uso de los fertilizantes nitrogenados provoca, que, para lograr un mayor rendimiento, se incrementa la cantidad de fertilizante a aplicar. Las dosis de fertilización se hacen de manera general para todos los agroecosistemas, sin tomar en cuenta las demandas, la fertilidad del suelo y la capacidad de retención de nutrientes de los suelos. De los insumos y labores que la producción de caña de azúcar requiere, los fertilizantes suelen ser los más costosos. La adquisición de fertilizante se ubica entre el 20 % y el 29 % de los costos totales de producción (Moreno-Seceña, 2010; Rebollar *et al.*, 2017). Sin embargo, se estima que las plantas solo absorben entre el 30 y el 57 % de lo aplicado (Salgado-García *et al.*, 2001; Landeros-Sánchez *et al.*, 2007), el resto se pierde ya sea por volatilización, escurrimiento o lixiviación (Li *et al.*, 2017; McDonald *et al.*, 2020). Se estima que del nitrógeno aplicado como fertilizante se llega a perder el 56% por escurrimiento (Causapé *et al.*, 2004), el 16 % por lixiviación (Moreno-Seceña, 2010) y 10 % por volatilización (Li *et al.*, 2017). El nitrógeno que no es recuperado en los agroecosistemas contribuye a la contaminación de los mantos freáticos y cuerpos superficiales de agua, provocando ecotoxicidad, eutrofización y acidificación (Shahrokhnia y Sepaskhah, 2016; El Chami *et al.*, 2020); lo que a la larga ocasiona problemas ambientales y de salud en la población aledaña. Lo anterior plantea la necesidad de mejorar las prácticas agrícolas

encaminadas a disminuir las pérdidas de nitrógeno fertilizante para así rediseñar agroecosistemas tendientes a lograr mayores niveles de sustentabilidad que disminuyan el impacto ambiental en beneficio de las comunidades. Una alternativa para lograr reducir las pérdidas de fertilizantes a través de la implementación de sistemas de fertirriego (García-Saldaña *et al.*, 2019). En la región de Actopan, Veracruz. Hay agroecosistemas que han implementado sistemas de riego de baja presión y multicompuerta, esto como respuesta al hecho de que sus parcelas estaban por arriba del nivel de los canales de distribución. En estos agroecosistemas se ha propuesto la implementación del fertirriego con la finalidad de incrementar la eficiencia en el uso de fertilizantes y disminuir el impacto ambiental por su descarga en ríos y lagunas. Para tal propósito, se ha avanzado en el desarrollo de un sistema de inyección de fertilizantes y se ha comprobado que funciona adecuadamente en la distribución del fertilizante mediante un sistema de riego multicompuertas (García-Saldaña, 2018).

Con el uso del dispositivo Venturi, se vuelve relativamente fácil inyectar el fertilizante disuelto en el agua de riego en superficies más grandes, en comparación con el uso de pequeñas bombas que inyectan limitadas cantidades de fertilizante en un solo surco (Sabillón y Merkley, 2004; Abbasi F. *et al.*, 2012; Bai *et al.*, 2013; Antille, 2018) que es la manera en como se ha evaluado hasta el momento. Una de las desventajas del fertirriego de baja presión y multicompuerta es la presupuesta baja eficiencia, en comparación con los sistemas de riego presurizado. Sin embargo, se ha demostrado que ajustando los parámetros que definen el fertirriego es posible alcanzar eficiencias comparables a los sistemas de riego presurizado (Abbasi *et al.*, 2003; Abbasi *et al.*, 2012; Moravejalahkami *et al.*, 2012; Ebrahimian, 2014) La eficiencia del fertirriego se mide a través de la uniformidad con la que se distribuyen los fertilizantes y la cantidad con la que éstos permanecen en el perfil del suelo disponible para los cultivos, esta última se le llama “eficiencia de aplicación”. Por otro lado, en la literatura científica se plantea que si para el riego, altos valores de uniformidad están relacionados con altos valores de producción de cultivos, lo mismo sucedería para los fertilizantes aplicados a través de fertirriego. La eficiencia del fertirriego está en función de una serie de variables, mismas que se resumen en: el gasto y patrón de entrada de fertilizante, las características de infiltración

del suelo y el tiempo de inicio del fertirriego (Abbasi *et al.*, 2003; Moravejalahkami *et al.*, 2012; Ebrahimian *et al.*, 2014).

En la literatura científica no hay un acuerdo claro sobre los valores óptimos para el tiempo de inicio del fertirriego y el gasto de entrada, ya que éstos dependen de las características del sistema de riego y la infiltración del suelo, lo que dificulta la toma de decisiones para los productores de caña de azúcar. Sin embargo, el fertirriego ofrece una oportunidad para mejorar la eficiencia en la aplicación de fertilizantes en los cultivos de caña de azúcar, lo que puede llevar a reducir las dosis de fertilizantes y disminuir las pérdidas asociadas, así como mejorar la productividad del cultivo. Es fundamental avanzar en la investigación y encontrar soluciones efectivas que permitan mejorar la gestión del fertirriego, para que los productores puedan maximizar la rentabilidad de sus cultivos y contribuir a la sostenibilidad del sector agropecuario.

2.3.2. Definición del problema de investigación

La baja eficiencia de la fertilización en la producción de caña de azúcar consecuencias económicas y ambientales negativas. Una de las propuestas para reducir tales efectos y hacer más eficientes los sistemas de producción es implementando el fertirriego. En los sistemas de producción de caña de azúcar dentro del proyecto “El Manzano”, ubicados dentro del Módulo de Riego II-1 Actopan, existen los sistemas de riego de baja presión y multicompuerta, donde se busca implementar el fertirriego utilizando un dispositivo Venturi el cual ha mostrado un adecuado desempeño en cuanto a la inyección y distribución de fertilizantes en el sistema de riego (García-Saldaña, 2014; García-Saldaña *et al.*, 2019). Pero aún falta conocer cómo ajustar las variables que influyen en el desempeño y eficiencia del fertirriego, es por ello que se plantea la siguiente pregunta: ¿Cómo influye el tiempo de inyección y la dosis de nitrógeno fertilizante en la eficiencia de la fertirrigación y en la producción en un sistema de riego de baja presión y multicompuertas en el agroecosistema con caña de azúcar en el ejido Los Ídolos, Actopan, Veracruz?

Los resultados contribuirán a la comprensión de los factores que influyen en la eficiencia de la fertirrigación en la producción de caña de azúcar, y ayudará a establecer estrategias y políticas para mejorar la eficiencia en la fertilización y el uso del agua, lo que tendrá un impacto positivo en la sostenibilidad del agroecosistema con caña de azúcar en Actopan, Veracruz.

III.HIPOTESIS Y OBJETIVOS

Hipótesis General

El tiempo de inyección del nitrógeno fertilizante y la dosis de nitrógeno fertilizante tienen un efecto significativo en la eficiencia de la fertirrigación y en la producción en un sistema de riego de baja presión y multicompuertas en el agroecosistema con caña de azúcar en el ejido Los Ídolos, Actopan, Veracruz.

Se espera que una dosis adecuada de nitrógeno fertilizante, combinada con un tiempo de inyección óptimo, aumente la eficiencia de la fertirrigación y la producción de caña de azúcar en el sistema de riego de baja presión y multicompuertas en el área de estudio.

Hipótesis Específicas

1. La eficiencia de aplicación del nitrógeno mediante fertirriego, varían en función del tiempo de aplicación y dosis de nitrógeno en un sistema de riego de baja presión y multicompuerta.
2. Con la aplicación de nitrógeno mediante fertirriego se incrementa la eficiencia de uso del agua y nitrógeno fertilizante, así como el rendimiento en el agroecosistema con caña de azúcar.
3. La producción por unidad de superficie de agroecosistema caña de azúcar está directamente relacionada con la dosis de nitrógeno, tiempo de aplicación y uniformidad del fertirriego.

Objetivo general

Determinar la combinación de los factores tiempo de aplicación del fertirriego y dosis de nitrógeno fertilizante que den como resultado los mayores índices de eficiencia del

fertirriego y rendimiento de los agroecosistemas con caña de azúcar en el Ejido Los Ídolos de Piedra, Actopan, Veracruz.

Objetivos específicos

1. Determinar el desempeño de la fertirrigación bajo dos tiempos de aplicación en combinación con dos dosis de nitrógeno en un sistema de riego de baja presión y multicompuerta medidos a través de la uniformidad de la distribución y el coeficiente de distribución de Christiansen.
2. Conocer los indicadores de huella hídrica, eficiencia de uso de nitrógeno y productividad de caña de azúcar resultantes de las combinaciones de las variables tiempo de fertirriego y dosis de nitrógeno fertilizante.
3. Establecer la relación entre la producción por hectárea del agroecosistema con caña de azúcar con la dosis de nitrógeno, tiempo de fertirriego, la eficiencia de aplicación, uniformidad de la distribución y el coeficiente de uniformidad de Christiansen.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Experimento de campo

4.1.1. Ubicación geográfica del área experimental

El experimento se llevó a cabo en el ejido Los Ídolos, Municipio de Actopan, Veracruz. Los productores con los que se trabajará forman parte del proyecto “El Manzano”. La ubicación UTM de la localidad es 14Q 764812.33, 2152593.00. La irrigación en dicho ejido es suministrada por el Modulo de Riego 1- II-Actopan del Distrito de Riego 035; el cual se abastece de los ríos Actopan y La Antigua. La superficie irrigada de este distrito es de 2 827 Km².

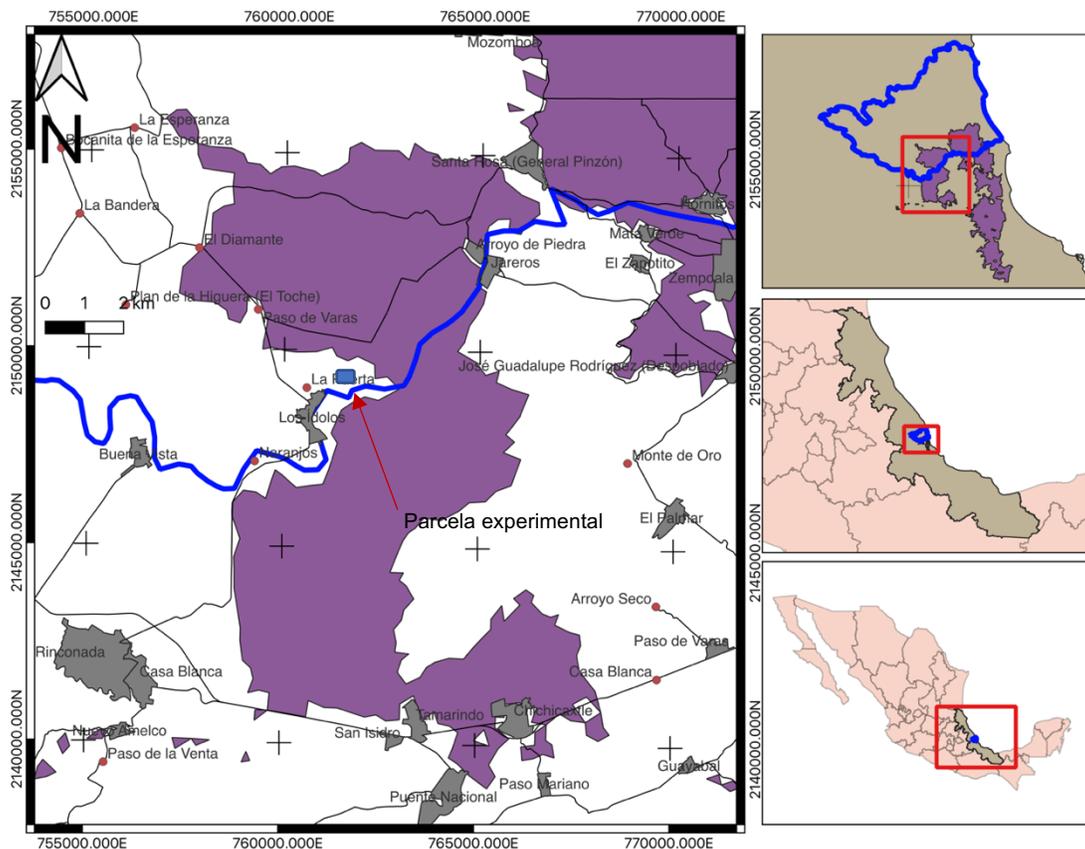


Figura 6. Ubicación de la parcela experimental con respecto al Distrito de Riego 035 (■) La Antigua, el municipio de Actopan (■), el estado de Veracruz (■) y de la República Mexicana.

4.1.2. Diseño experimental

El modelo estadístico del diseño experimental fue el mostrado en la Ecuación (17)

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \gamma_k + E_{ijk} \quad (17)$$

Donde:

Y_{ijk} : es la k -ésima observación de los i - j -ésimos tratamientos o resultados de las variables respuesta.

i : 1, ..., a niveles del factor dosis de nitrógeno.

j : 1, ..., b niveles del factor tiempo de fertirriego.

k : 1, ..., r números de bloque.

μ : es la media general.

α_i : Es el i -ésimo efector del factor dosis de nitrógeno.

β_j : Es el j -ésimo efecto del factor tiempo.

$(\alpha\beta)_{ij}$: Es el ij -ésimo efecto de la interacción entre la dosis de nitrógeno y el tiempo de fertirriego.

γ_k : Es el k -ésimo bloque.

Las variables fueron probadas bajo las siguientes hipótesis.

$H_{01}: \alpha_1 = \alpha_2 = 0$	Vs	$H_{a1}: \alpha_i \neq 0;$	Por lo menos para algún i
$H_{02}: \beta_1 = \beta_2 = 0$	Vs	$H_{a2}: \beta_j \neq 0;$	Por lo menos para algún j
$H_{03}: (\alpha\beta)_{ij} = 0$	Vs	$H_{a3}: (\alpha\beta)_{ij} \neq 0;$	Por lo menos para algún ij
$H_{04}: \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 0$	Vs	$H_{a4}: \gamma_k \neq 0;$	Por lo menos para algún k

4.1.3. Diseño de tratamientos

Los tratamientos se generan de la combinación de los niveles de los factores a evaluar, por lo que se considera un diseño factorial completo 2². Los factores evaluados fueron dos dosis de fertilización en combinación con dos tiempos de fertirriego. La dosis base de nitrógeno, usada de forma convencional, que se aplica es de 261 kilogramos de nitrógeno por hectárea (kg N ha⁻¹), en dos fracciones, una al inicio del ciclo, previo al primer riego, y el segundo a los cinco meses. En la primera se aplican 100 kg del total nitrógeno contemplado, mientras que, en la segunda, los 161 kg restantes (Cuadro 8).

Cuadro 8. Descripción de la fertilización convencional utilizada en la zona de estudio.

Aplicación	Fórmula (N – P – K)	Cantidad (kg)	N adicionado (kg)
Primera	20 – 10 – 20	500	100
Segunda	46 – 0 – 0	350	161

Los niveles de dosis de nitrógeno en fertirriego se propusieron con base en la cantidad de nitrógeno destinado para la segunda fertilización, 161 kg N ha⁻¹ (Cuadro 9). Dichos valores fueron el 50 y 100 %.

Cuadro 9. Descripción de los niveles del factor dosis de nitrógeno en fertirriego.

Factor	Niveles del factor	N aplicado (kg)	
		En fertirriego	Total
Dosis de nitrógeno	100 %	161	261
	50 %	80.5	181.5

Los niveles del factor tiempo de fertirriego se proponen con base la duración del periodo de avance-recesión del fertirriego. En un ensayo previo al primer fertirriego, se observó y estableció que el tiempo de avance fuera de 105 minutos. Con base en ello se estableció que los niveles de tiempo de riego fueran 100 y 50 minutos, es decir 100 y 50 % del tiempo de avance. Además, se consideró regar 20 minutos más con la finalidad de asegurar que el fertilizante alcanzara el final de los surcos (Cuadro 10).

Cuadro 10. Descripción de los niveles del factor duración del fertirriego.

Factor	Minutos ⁺
Tiempo de fertirriego	100
	50

⁺Contados desde el inicio del fertirriego.

Los tratamientos con los niveles antes descritos se muestran de forma resumida en el Cuadro 11. En total se tienen cuatro tratamientos de la combinación de los dos niveles de nitrógeno en combinación con los dos tiempos de fertirriego, se incluye además un tratamiento testigo que consiste en la aplicación de 161 kg N ha⁻¹ aplicado al boleo en el mes de octubre, que es la forma típica o convencional de aplicar fertilizante nitrogenado.

Cuadro 11. Codificación y valores correspondientes de los tratamientos evaluados.

Numero de tratamiento	Factor N	Tiempo	Dosis de N en fertirriego	Tiempo de fertirriego (min)
1	N ₅₀	T ₅₀	80.5	50
2	N ₁₀₀	T ₅₀	161	50
3	N ₅₀	T ₁₀₀	80.5	100
4	N ₁₀₀	T ₁₀₀	161	100
5	N ₁₀₀	-	-	-

El experimento consistió en cinco tratamientos con tres repeticiones obteniéndose un total de 15 unidades experimentales. Las unidades experimentales (UE) fueron aleatorizadas en el área experimental utilizando un modelo de diseño en bloques al azar, donde cada lo que se le asignó una repetición de cada tratamiento.

Cada repetición se asignó a una de las tres parcelas en que se dividió el área experimental. Dentro de cada parcela los tratamientos se distribuyeron cada unidad experimental (UE) consistió en una parcela de 5 surcos. La longitud de las unidades

experimentales fue variables debido a la forma del terreno. Los tratamientos propuestos se dividieron en tres aplicaciones, llevadas a cabo en las fechas mostradas en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Fechas de los eventos de fertirriego y, de siembra y cosecha de la caña de azúcar en la parcela experimental.

Evento	Fecha
Siembra de la parcela	julio de 2021.
Primer fertirriego	4 – 6 de noviembre de 2021
Segundo fertirriego	20 – 26 de diciembre de 2021
Tercer fertirriego	2 – 5 de febrero de 2022
Cosecha	1 – 21 abril de 2022

4.1.4. Unidades experimentales

Cada unidad experimental consistió en una porción de parcela de cinco surcos de 1.34 m de ancho, por 100 m de longitud. Cabe señalar que la longitud de los surcos de la parcela variaba desde 105 a 136 m, por lo tanto, la cantidad de fertilizante a utilizar se estimó con base a surcos de 136 m. El tamaño adecuado de parcelas para experimentos en caña de azúcar se ha establecido entre 72 a 93 m² por parcela experimental por Barrantes-Aguilar *et al.* (2020). Mientras que Martínez-Wilches *et al.* (1984) estimaron el tamaño óptimo en 5 surcos de 7 – 9 m. En este caso el tamaño de la parcela se propuso con base en el la observación de la distribución de fertilizantes a lo largo del surco, el cual se ha hecho en experimentos desde 4 m (Pahlevani *et al.*, 2021) hasta 180 – 200 m (Abbasi *et al.*, 2012, 2015), dependiendo más bien del tamaño de las parcelas en las que se realizan las evaluaciones.

4.1.5. Preparación de la solución nutritiva

Para preparar la solución nutritiva se dispuso de un contenedor de 1000 litros de capacidad. En cada fertirriego se agregaron las cantidades de urea indicadas en el Cuadro 13 de acuerdo con el tratamiento que se tratase. En cada evento de fertirriego se preparó la

cantidad de solución nutritiva para aplicarse a dos tratamientos con el mismo nivel de dosis de nitrógeno, pero con tiempos de inyección diferentes. A cada tratamiento le fue correspondido un volumen de 500 litros de solución nutritiva, misma que se obtuvo regulando el gasto de inyección a 5 y 10 litros por minuto (lpm) de acuerdo con los niveles del factor tiempo de fertirriego. El gasto de inyección fue regulado utilizando un rotámetro marca Purikor, modelo Metro5A-0.5 y controlado mediante una válvula de globo de PVC de una pulgada.

Cuadro 13. Gasto de inyección de la solución nutritiva y volumen final inyectado de acuerdo con los niveles de la variable tiempo de fertirriego.

Tiempo de fertirriego (min)	Gasto de inyección (lpm)	Volumen inyectado (L)
100	5	500
50	10	500

4.1.6. Variables respuesta

Para analizar el efecto de los tratamientos, se proponen una serie de variables respuesta acordes con las hipótesis y objetivos planteados. A continuación, se describen cada una de las elegidas para la presente tesis.

4.1.6.1. Uniformidad del fertirriego

La uniformidad del fertirriego es una variable que indica qué tan bien se distribuye el nitrógeno fertilizante a lo largo del surco. Esta variable se determinó mediante dos indicadores, la uniformidad de la distribución del cuarto más bajo ($UD_{1/4}$, Ecuación (3) y el coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC, Ecuación (4)). Una forma más comprensiva de escribir la Ecuación (3) es como se presenta en la Ecuación (18).

$$UD_{1/4} = \frac{\bar{N}_{1/4}}{\bar{N}_n} \times 100 \quad (18)$$

Donde $\bar{N}_{1/4}$ es el promedio de la cuarta parte más baja del conjunto de datos que representa el contenido de nitrógeno en los n puntos a lo largo del surco, n es el número de puntos donde se cuantificó el contenido de nitrógeno a lo largo del surco; \bar{N}_n , es el promedio de contenido de nitrógeno en todos los puntos muestreados a lo largo del surco. La concentración de nitrógeno en el suelo esta dado en mg kg^{-1} , pero en las operaciones las unidades se cancelan, por lo que los valores de uniformidad están en puntos porcentuales Dado que, como se muestra más adelante, en cada surco se cuantificó el contenido de nitrógeno amoniacal en cinco puntos, para obtener un número, múltiplo de cuatro, de datos de nitrógeno en el suelo, se promediaron los puntos contiguos obteniendo un total de cuatro valores en cada unidad experimental, siendo el valor más bajo de ellos el valor considerado como el $\frac{1}{4}$ más bajo. El CUC fue estudiado utilizando los valores de nitrógeno amoniacal en los cinco puntos de muestreo a lo largo del surco.

El contenido de nitrógeno a lo largo del surco. Para cuantificarlo fue necesario muestrear y determinar el contenido de nitrógeno en el suelo en cinco puntos a lo largo del surco central, a una profundidad de 30 cm, tal y como se muestra en la Figura 7.

La uniformidad del fertirriego fue estimada en todas las parcelas del primer evento de fertirriego, y en el bloque número uno en el segundo y tercer evento de fertirriego. Esta variable también fue estimada también mediante simulaciones computarizadas utilizando el modelo SURCOS (Burguete *et al.*, 2014).

La uniformidad del fertirriego se comparó entre tratamientos en el primer fertirriego, teniendo, por un lado, los bloques y por el otro, a los eventos de fertirriego como repeticiones en el bloque 1.

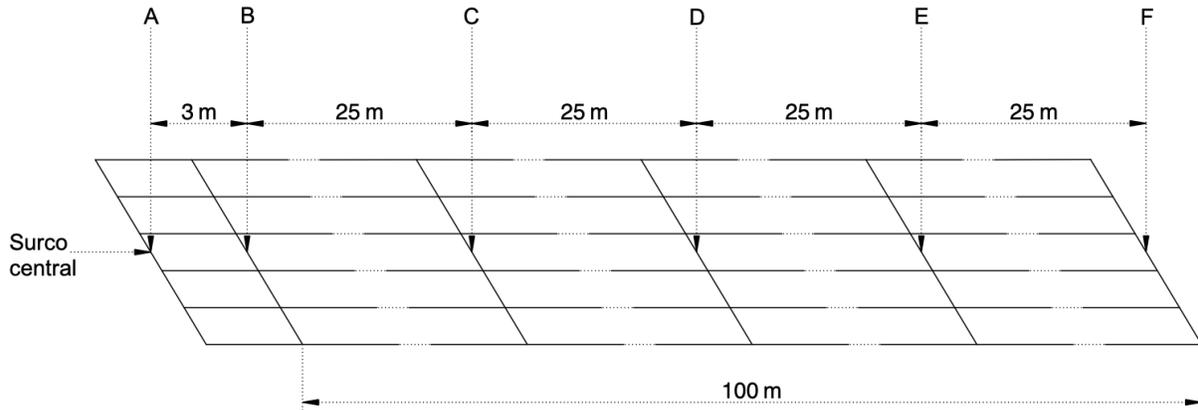


Figura 7. Esquema de puntos de muestreo de suelo en cada unidad experimental. A: Inicio del surco y entrada del agua; B, C, D, E y F son puntos de muestreo 0,1 ,2 ,3 y 4.

4.1.6.2. Eficiencia del fertirriego

La eficiencia de aplicación se define como la relación de masa efectiva de fertilizante nitrogenado con respecto a la masa del nitrógeno que entró en el surco (Zerihun *et al.*, 2003). Se define por la Ecuación (19):

$$E_{aN} = \frac{\sum_{j=1}^J M_{EN}^j}{\int_{t_{aoN}}^{t_{roN}} Q_0(t) N_{OC}(t) dt} \times 100 \quad (19)$$

Donde j representa a cada uno de los puntos de muestreo (1 – 5), M_{EN}^j es la masa de fertilizante efectivo en los j -ésimos puntos consecutivos en el canal o surco (mg kg^{-1}); t_{aoN} es el tiempo medido a partir del inicio del riego al que el fertilizante es detectado por primera vez al final del canal (segundos); t_{roN} el tiempo a partir del inicio del riego en que la concentración de fertilizante es cero al final del surco (segundos); Q_0 es el gasto de entrada al surco ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); N_{OC} es la concentración del fertilizante en el agua al inicio del surco (mg L^{-1}). La E_{aN} es expresada en puntos porcentuales.

La eficiencia del fertirriego fue estimado mediante simulaciones computarizadas utilizando el modelo SURCOS (Burguete *et al.*, 2014). Los indicadores de uniformidad y eficiencia se calcularon utilizando una implementación en el programa RStudio utilizando el archivo de salida de datos en formato de texto. Se utilizaron los datos de contenido de fertilizante estimados mediante el modelo Surcos a lo largo de 100 metros de surco, esto debido a que no todos los surcos tenían la misma longitud y para simplificar la ejecución y análisis de resultados de las simulaciones.

4.1.6.3. Eficiencia de agua

La eficiencia de uso de agua fue estimada mediante los valores de huella hídrica verde y azul. Misma que se calculó utilizando la metodología propuesta por Hoekstra *et al.* (2011). El consumo de agua es equivalente a la estimación de la evapotranspiración del con el modelo CropWat 8, utilizando información meteorológica de la estación de Los Ídolos, del municipio de Actopan, Veracruz y los datos de cultivo y suelo arcilloso precargados en el modelo.

4.1.6.4. Eficiencia del nitrógeno fertilizante

La eficiencia de uso del nitrógeno fertilizante se midió a través de la recuperación aparente de nitrógeno: este indicador se calculó mediante la Ecuación (6).

$$EAN = \frac{N_t}{N_s} \quad (20)$$

Donde N_t es el nitrógeno total en contenido en la totalidad de la producción en la etapa de madurez por cada hectárea considerada (kg ha^{-1}), N_s es la dosis de nitrógeno (kg ha^{-1}). El Valor de N_t se estimó al multiplicar el rendimiento en peso de caña de azúcar por un factor de 1.8, que es la cantidad de nitrógeno (kg) que extrae la planta por cada tonelada de caña de azúcar producido (Castellanos *et al.*, 2010). N_s , Es la dosis de

nitrógeno que se aplicó en cada tratamiento estimada a partir de los gastos de entrada en cada parcela el bloque uno (kg ha^{-1}).

4.1.7. Levantamiento y preparación de las muestras de suelo

Se tomaron muestras de suelo después de cada evento de fertirriego en cinco puntos a lo largo del surco central dentro de cada unidad experimental en el primer evento de fertirriego. En el segundo y tercer fertirriego se tomaron las muestras en los mismos puntos, pero limitándose a las parcelas del primer bloque. Las muestras fueron extraídas con una barrena tubular de PVC enterrada a una profundidad de 30 cm. Las muestras de suelo fueron secadas y preparadas mediante el procedimiento estándar indicado en la NOM – 021.

4.1.8. Extracción y determinación de nitrógeno del suelo

El contenido de nitrógeno en el suelo fue evaluado en los diferentes tratamientos mediante el valor de nitrógeno amoniacal. La extracción de amonio se hizo utilizando cloruro de potasio (KCl) 1 M como extractante (Kachurina *et al.*, 2000). Posteriormente el contenido de amonio se determinó utilizando el método colorimétrico de Berthelot adicionando ureasa para considerar la urea presente en las muestras utilizando el kit de determinación de ureasa de la marca Valtek.

4.1.9. Producción por unidad de superficie

La producción por unidad de superficie se estimó en cinco puntos a lo largo de las unidades experimentales ubicados a la misma altura que los puntos de muestreo de suelo. En cada punto se midió el peso y número de tallos producidos en 5 m^2 , que resultaban de tomar dos segmentos de surco de 1.9 m de longitud. En total se obtuvo el peso de tallos de caña de azúcar en 25 m^2 en cada unidad experimental.

4.1.10. Masa de fertilizantes aplicado

El nitrógeno se aplicó en forma de urea en los tres fertirriegos. La masa (en kg) de la urea aplicada fue estimada considerando la superficie formada por cinco surcos de 1.34 m de ancho por 136 m de longitud. La superficie resultante fue de 911.2 m² por unidad experimental. Al considerar las tres parcelas por tratamiento. El total de la superficie por tratamiento fue de 2733.6 m². En el

Cuadro 14 se muestran las cantidades de urea utilizadas en cada tratamiento, considerando la superficie destinada a cada uno. Para el caso de los tratamientos con 100 % de dosis de nitrógeno, la masa de nitrógeno por tratamiento que se requirió se obtuvo de multiplicar de 161 kg N ha⁻¹ por la 0.27336, que es la fracción de hectárea de la superficie de cada tratamiento, dando como resultado 44.01 kg de N por tratamiento. Para expresar la cantidad de nitrógeno en kg de urea, se dividió 44.01/0.46, lo cual da como resultado 95.70 kg de urea por tratamiento. Para obtener la cantidad de urea para los tratamientos de 50 % de nitrógeno se procedió de forma similar.

Cuadro 14). Como las tres parcelas correspondientes a cada dosis se aplicaron al mismo tiempo, la urea utilizada en las tres parcelas se disolvió en un mismo contenedor. Las dosis se dividieron en tres aplicaciones en el mismo número de eventos de fertirriego.

Cuadro 14. Masa de urea aplicada en cada fertirriego en los tratamientos de 161 y 80.5 kg N en fertirriego en cada evento.

Dosis de nitrógeno	Masa de urea por cada fertirriego (kg)			Total
	Primer	Segundo	Tercer	
161	50	25	20.7	95.70
80.5	25	12.5	10.35	47.85

4.1.11. Parámetros de las simulaciones

Los parámetros del modelo se ajustaron con datos tomados en campo como:

Geometría del surco. Considera las medidas y pendientes de las paredes del surco. En campo la forma de los surcos es irregular, pero se consideró que las medidas descritas en la Figura 8 se acercan a las medidas del surco por donde se movió el agua en el fertirriego.

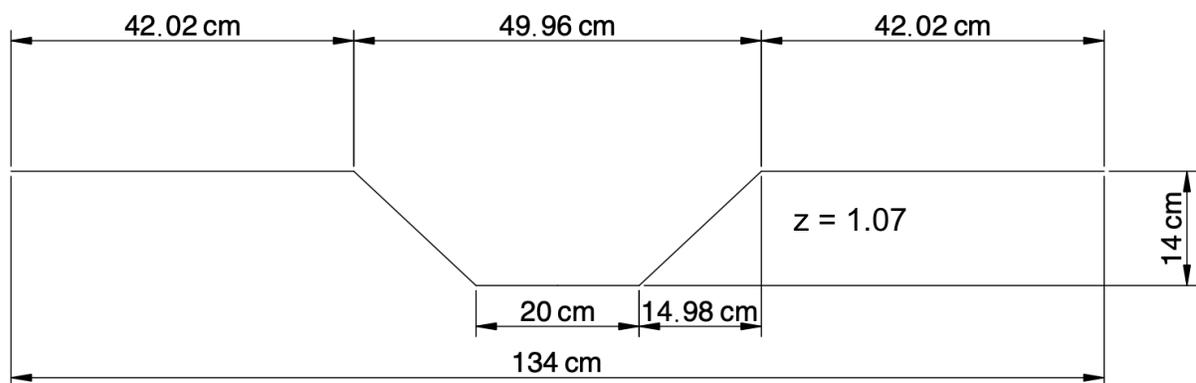


Figura 8. Variables geométricas del surco consideradas para las simulaciones (z = pendiente o talud de la sección).

Longitud del surco. En campo la longitud de los surcos varía de 105 a 136 m de longitud. Para las simulaciones se consideró únicamente una longitud de 100, aunque como se explica más adelante, las dosis de fertilización se ajustaron para una superficie de surcos dada por 136 m de longitud de los surcos, esto con la finalidad de cubrir en la medida el total de la parcela con la fertilización, y considerando que se esperaba que una parte del agua y fertilizante saldrían más allá de los 100 m estudiados.

Pendiente del surco. La medida de la pendiente del surco se obtuvo a partir del plano topográfico del proyecto El Manzano. El valor de la pendiente fue de 0.005 m/m.

Gasto de entrada al surco. Esta variable se obtuvo midiendo el volumen que despachaba las compuertas en el surco central de cada parcela, dividida entre el tiempo que se tomó obtener la muestra.

Tiempos de avance y recesión. Se cronometró el tiempo de avance del agua en el surco a cada uno de los puntos, siendo los mismos que los puntos de muestreo. Las distancias fueron de 0, 25, 50, 75 y 100 m de distancia con respecto al inicio del surco o cabecera.

Tiempo de inicio y fin del riego y del fertirriego. A la par que el punto anterior, se tomó el tiempo de inicio y finalización del riego y del fertirriego, ya que estos datos son necesarios para el cálculo del volumen de agua y de la masa del fertilizante que entra al surco.

4.1.12. Coeficientes de infiltración

Para llevar a cabo las simulaciones del proceso de fertirriego es necesario contar con una serie de parámetros que utiliza el modelo. Uno de ellos es el modelo de infiltración. En la literatura existen diversos modelos de infiltración, sin embargo el más utilizado en el de Kostiakov-Lewis (Mazarei *et al.*, 2020; Ecuación (21)).

$$Z = kt^a + f_0t \quad (21)$$

Donde Z es la infiltración acumulada (m), t es el tiempo que dura la infiltración en segundos (segundos), F_0 es la tasa de infiltración básica ($m\ s^{-1}$), " k " ($m\ s^{-a}$) y " a " (adimensional) .

Para determinar los valores de los coeficientes k y a se siguió el método de los dos puntos propuestos por Elliott y Walker (1982), resolviéndolo siguiendo el procedimiento propuesto por Seyedzadeh *et al.* (2019). Mediante prueba y error se evaluaron diferentes valores de k , a , coeficientes de rugosidad de Manning (n) y el factor de forma del perfil

de la superficie σ_y), hasta encontrar los valores más cercanos a los ideales en los índices de evaluación de las simulaciones.

4.1.13. Evaluación de las simulaciones

Para evaluar la pertinencia de las simulaciones se compararon los resultados de tiempos de avance observados en campo con los obtenidos en las simulaciones a los 25, 50 75 y 100 metros dentro del surco, con lo que se obtuvieron valores de precisión de la simulación. Los índices que se utilizaron fueron el error medio cuadrático normalizado (NRMSE¹⁶), diferencia de tiempo a los cien metros (DT₁₀₀), los cuales se muestran en las Ecuaciones (22) y (23); así como la máxima distancia de flujo simulada (MaxDist, en metros).

$$NRMSE = \left[\frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum_1^N (O_i - P_i)^2}{N}} \right] \times 100 \quad (22)$$

$$DT_{100} = T_O - T_S \quad (23)$$

Donde O_i y P_i representan los valores observados y predichos de los tiempos de avance (segundos), N es el número de observaciones, O es el tiempo de avance promedio (segundos). T_O y T_S son los valores de tiempo observados y simulados que se llevo al flujo en el surco alcanzar los 100 metros de distancia.

4.2. Análisis estadístico

El efecto del tiempo de fertirriego y dosis de nitrógeno sobre las variables respuesta uniformidad y eficiencia, se realizaron análisis de varianza (Anova) y pruebas de Duncan

¹⁶ Acrónimo de Normalized Root Mean Square Error en idioma inglés

utilizando el SAS® *OnDemand for Academics* (SAS Institute, Cary, NC). Se seleccionó la prueba de Duncan debido a que los tratamientos fueron tratados como valores ordinales, donde los niveles de los factores corresponden con un ámbito más que con valores puntuales (Wong-González, 2010), esto debido a las variaciones que se presentan en el proceso de aplicación de los tratamientos en precisión y las diferencias temporales de la aplicación de los tratamientos. Las gráficas y las tablas fueron elaboradas y organizadas utilizando la librería *ggplot2* del paquete computacional R y RStudio (R Core Team, 2022).

Los análisis de regresión y su validación estadística se hizo mediante el paquete la función de análisis de datos de la opción de herramientas de análisis del paquete Microsoft Excel®.

V. RESULTADOS

5.1. Eficiencia del fertirriego

En la Hipótesis uno se postula una relación entre la eficiencia de la fertirrigación con las variables tiempo de aplicación (TA) y dosis de nitrógeno (DN). La eficiencia de la fertirrigación se midió con dos indicadores: uniformidad y la eficiencia de aplicación. Para probar esta hipótesis se utilizaron dos enfoques comúnmente mencionados en la literatura, el experimento de campo y simulaciones computarizadas.

$$\text{Eficiencia del fertirriego} = f(\text{tiempo de fertirriego}, \text{dosis de nitrógeno})$$

La eficiencia del fertirriego se cuantificó mediante dos indicadores: la uniformidad y la eficiencia de aplicación y estimó la eficiencia de aplicación. A su vez, la uniformidad se expresa mediante los valores de la uniformidad de la distribución y el coeficiente de uniformidad de Christiansen.

5.1.1. Uniformidad del fertirriego

Uniformada por bloques. La uniformidad del fertirriego se evaluó mediante los indicadores Coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC) y Uniformidad de la distribución del cuarto más bajo ($UD_{1/4}$). Estos valores son indicadores de la distribución del nitrógeno fertilizante. El nitrógeno fertilizante se aplicó en forma de urea y cuantificado mediante el contenido de nitrógeno amoniacal en el suelo a lo largo de los surcos. Para el análisis estadístico se hicieron dos comparaciones: 1) $UD_{1/4}$ y CUC entre tratamientos en el primer evento de fertirriego, teniendo a los bloques como repeticiones en los tres bloques de parcelas; 2) $UD_{1/4}$ y CUC entre tratamientos teniendo a los eventos de fertirriego como repeticiones en las parcelas del bloque uno. Los análisis de varianza se hicieron con base en las siguientes hipótesis estadísticas:

H₀: Los valores de UD_¼ y CUC de los diferentes tratamientos no son diferentes entre ellos.

H_a: Al menos uno de los tratamientos es diferente a de los demás en las variables UD_¼ y CUC.

En el Cuadro 15 se muestran los valores de Pr > F estimadas en el análisis de varianza. El valor de Pr > F indica la probabilidad de que la diferencia en tres los grupos comparados sea debida a azar o al error de medición, en lugar de ser una diferencia real o significativa. Los valores en el citado cuadro indican una alta probabilidad de que las diferencias observadas entre los bloques, tiempo de fertirriego (TF), dosis de nitrógeno (DN) y la interacción entre TF y DN, sobre las variables UD_¼ y CUC sean debido al azar o al error de medición y que no sean estadísticamente significativas. Por lo que no hay suficiente evidencia para concluir que al menos una de las medias de UD_¼ y CUC de los tratamientos sea diferente a la de los demás.

Cuadro 15. Valor de Pr > F de las variables respuesta CUC y UD_¼ en función de tiempo de fertirriego y de la dosis de nitrógeno.

Fuente de variación	En el primer fertirriego		En los tres fertirriegos	
	CUC	UD _¼	CUC	UD _¼
	Bloque	0.83 ^{ns}	0.90 ^{ns}	0.49 ^{ns}
Tiempo de fertirriego (TF)	0.84 ^{ns}	0.53 ^{ns}	0.08 ^{ns}	0.29 ^{ns}
Dosis de nitrógeno en fertirriego (NF)	0.57 ^{ns}	0.53 ^{ns}	0.56 ^{ns}	0.48 ^{ns}
TF x NF	0.54 ^{ns}	0.86 ^{ns}	0.72 ^{ns}	0.39 ^{ns}

Significancia de Duncan alpha = 0.05

El CUC es un indicador utilizado para evaluar la distribución de agua, principalmente, y propuesto como factible para evaluar la distribución de los nutrientes aplicados mediante fertirriego en sistemas de riego por gravedad (Zerihun *et al.*, 2003). Los resultados de

CUC y UD en el primer evento de fertirriego y en los tres eventos se muestran en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Coeficiente de uniformidad de Christiansen y Uniformidad de la distribución en el cuarto más bajo en función del tiempo de fertirriego y dosis de nitrógeno en fertirriego.

Dosis de N en fertirriego Kg N ha ⁻¹	Tiempo de fertirriego (m)	Primer fertirriego		En los tres eventos de fertirriego	
		CUC	UD $\frac{1}{4}$	CUC	UD $\frac{1}{4}$
80.5	50	87.8	87.2	84.3	87.2
	100	83.7	89.0	88.6	92.6
161.0	50	87.6	89.0	81.8	87.6
	100	89.6	89.6	88.0	88.3

Se observa que los valores de CUC y UD $\frac{1}{4}$ fueron mayores en los tratamientos con tiempos de fertirriego de 100 minutos con respecto a las mismas combinaciones con las dosis de nitrógeno en tiempos de 50 minutos. En la Figura 9 se pueden apreciar mejor que los cambios en los valores de CUC y UD $\frac{1}{4}$ al pasar de tiempos de fertirriego de 50 a 100 minutos son al alza, excepto en un caso, en la comparación entre tiempos de fertirriego con dosis de 161 kg N ha⁻¹ en el primer evento de fertirriego (Figura 9a). Mayores valores de CUC y UD $\frac{1}{4}$ sugieren mejores distribuciones de fertilizantes a lo largo de los surcos con tiempos de fertirriego largos y bajas concentraciones, que en aquellos con tiempos de fertirriego relativamente cortos y mayores concentraciones. Estos datos contrastan por lo presentado por Ebrahimian *et al.* (2013), quienes observaron experimentalmente que la mayor uniformidad en aplicación de fertilizantes en fertirriego se obtiene haciendo inyecciones relativamente cortas de tiempo y a tasas altas de inyección de fertilizantes. En cuanto al valor óptimo de CUC, este se ha reportado para la distribución del agua, sin embargo, se carece de un indicador claro de aceptabilidad del nivel de la CUC para la distribución de fertilizantes, nutrientes o solutos en fertirriego superficial. Si se toman los valores sugeridos de CUC para agua, la CUC para nitrógeno en el suelo estaría dentro del rango de lo aceptable de acuerdo con el indicador de 80%

(Flores-Gallardo *et al.*, 2014). Brunetti *et al.* (2018) observaron que la distribución de solutos en el fertirriego presenta un comportamiento distinto al de la distribución del agua.

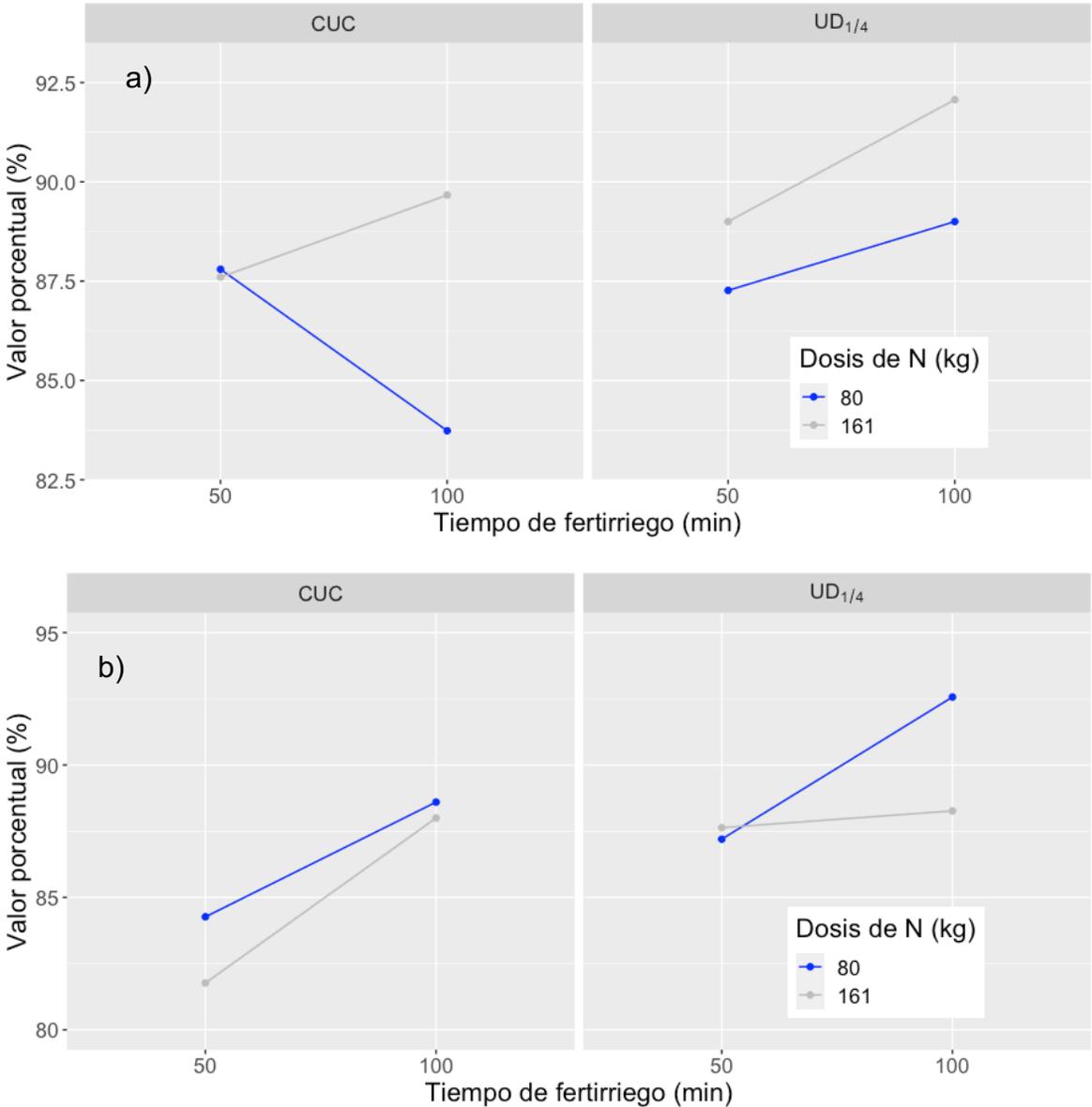


Figura 9. Valores porcentuales del CUC y DU¼ en función del tiempo y dosis de nitrógeno en fertirriego. a) Promedio de tres bloques en el primer evento de fertirriego; b) promedio de los tres eventos de fertirriego en el bloque uno.

El valor de CUC para distribución de fertilizantes en riego superficial (86 – 96 %), suele ser mayor que en distribución del agua (80 – 90 %) (Ebrahimian y Playán 2014).

Tomando como partida estos datos se puede establecer que el CUC de nitrógeno en el primer evento de fertirriego es aceptable, donde el valor fue mayor al 86 % en todos los tratamientos.

5.1.2. Uniformidad de la distribución de fertilizante mediante simulaciones

La uniformidad de la distribución en el cuarto más bajo ($UD_{\frac{1}{4}}$), es un indicador de la desviación del valor promedio del cuarto más bajo de los datos, con respecto al promedio total de los datos. En este caso, se tomaron cinco datos de nitrógeno en el suelo a lo largo del surco. Entre los cinco puntos hubo cuatro espacios, mismo que se les asignó el valor promedio de amonio del punto anterior y el punto siguiente, obteniendo en total valores de nitrógeno a lo largo del surco.

El valor de uniformidad de la distribución de agua óptimo se considera como $>85\%$ (Varela *et al.*, 2010). La uniformidad de la distribución es un indicador que ha sido utilizado por Abbasi *et al.* (2012), que presenta valores de $UD_{\frac{1}{4}}$ que varían desde 42.6 a 95.3 % para valores medidos en campo, cuyos parámetros fueron optimizados para buscando altas valores de uniformidad.

En conclusión, los valores de los índices de distribución del fertirriego, CUC y $UD_{\frac{1}{4}}$ no varían significativamente con respecto a los tratamientos. Esto podría ser debido a que las diferencias entre los niveles de los factores evaluados no son lo suficientemente grandes y a la redistribución del nitrógeno en el perfil del suelo en el tiempo transcurrido entre el fertirriego y el muestreo, y como consecuencia de la alta solubilidad del fertilizante utilizado, (Ebrahimian y Playán, 2014), en este caso urea. Sin embargo, si se observa una tendencia al incremento de los valores de CUC y DU cuando se pasa de un estado de fertirriego en 50 minutos al fertirriego en 100 minutos.

El tiempo de inyección de los fertilizantes en el fertirriego por gravedad es un factor considerado frecuentemente en la literatura científica. Ebrahimian *et al.* (2014) mencionan las discrepancias en las conclusiones respecto a los tiempos de inyección y concentración de las soluciones nutritivas. Mientras que unos autores recomiendan la

aplicación de los fertilizantes al durante la totalidad del tiempo que dura el riego, otros sugieren la aplicación en la primera mitad. En los resultados del presente estudio se observa que estadísticamente no existe diferencia en los indicadores de uniformidad por lo que no sería contradictorio indicar que cualquiera de las dos estrategias arrojaría los mismos resultados en cuanto a los indicadores de uniformidad del fertirriego. Solo el coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC) muestra una diferencia significativa con un valor de $Pr > F$ menor de 0.1 (Cuadro 15) para el tiempo de fertirriego obtenido de los tres eventos de fertirriego en el bloque uno. Los valores de uniformidad también fueron obtenidos mediante simulaciones, para lo cual, primero se determinaron los valores de coeficientes de Kostiaikov – Lewis a partir de los datos de tiempo de avance, que se muestran en el Cuadro 17. Complementados con los datos de gasto de entrada de agua y fertilizante se pudo simular los eventos de fertirriego en las parcelas del bloque uno en el segundo y tercer evento de fertirriego.

Cuadro 17. Tiempo de avance en segundos a diferentes distancias a lo largo del surco, gasto de entrada de agua y de fertilizantes en el surco en el segundo y tercer evento de fertirriego en las parcelas del bloque uno.

Tratamientos	Evento de fertirriego	Distancia de avance (m)				Q_{in} (l/s)	Q_f (kg/s)
		25	50	75	100		
T50N161	2	1314	4139	8098	13037	1.02	0.00060
	3	734	2396	4787	7820	1.34	0.00046
T50N80	2	1789	5150	9561	14830	0.91	0.00031
	3	720	2600	4280	7160	1.27	0.00023
T100N161	2	780	1703	2700	4320	1.05	0.00025
	3	773	2320	4413	6963	1.02	0.00023
T100N80	2	1412	3486	5915	8608	0.98	0.00014
	3	692	2177	4254	6844	1.08	0.00011

Los resultados de las simulaciones se muestran en el Cuadro 18. De acuerdo con Chimonyo *et al.* (2020), las simulaciones se consideran excelentes cuando los valores de NRSME son menores a 10 %, buenas de 10 – 20 %, aceptables para 20 – 30 % y

pobres cuando su valor supera el 30%. Con esto en consideración, se observa en el Cuadro 18 que los valores de NRMSE variaron entre 3 – 64.3 %, presentando valores excelentes en 7 casos, 3 en el rango de buenas, 1 apenas aceptable y 4 se consideraron pobres. Se observa que las simulaciones en el tercer fertirriego presentaron mejores índices de NRMSE que las del segundo fertirriego.

Cuadro 18. Valores estimados de coeficientes de k y a del modelo de infiltración de Kostiakov – Lewis, índices de evaluación de la simulación y criterios de selección de los valores de " y " y " n ".

Tratamiento	Criterio	σ_y	n	K (m s ^{-a})	a	NRMSE	Dist (m)
Segundo fertirriego							
T50N161	NRMSE _{Min}	0.1	0.38	0.002063	0.408	16.9	101
	Dist _{Max}	0.99	0.38	0.000329	0.582	58.3	136
T50N80	NRMSE _{Min}	0.9	0.52	0.000627	0.515	40.5	104
	Dist _{Max}	1.5	0.52	0.000076	0.715	64.3	136
T100N161	NRMSE _{Min}	0.5	0.08	0.002828	0.306	3.0	136
	Dist _{Max}	-	-	-	-	-	-
T100N80	NRMSE _{Min}	0.77	0.6	0.000742	0.467	7.5	120
	Dist _{Max}	0.99	0.52	0.000358	0.538	21.2	136
Tercer fertirriego							
T50N161	NRMSE _{Min}	0.2	0.4	0.001602	0.430	7.1	121
	Dist _{Max}	0.7	0.2	0.001647	0.427	31.7	136
T50N80	NRMSE _{Min}	0.3	0.24	0.002889	0.361	3.6	122
	Dist _{Max}	0.7	0.48	0.000360	0.567	11.7	136
T100N161	NRMSE _{Min}	0.3	0.28	0.001392	0.410	5.4	129
	Dist _{Max}	0.2	0.24	0.001178	0.427	13.3	136
T100N80	NRMSE _{Min}	0.2	0.33	0.001022	0.446	6.1	133
	Dist _{Max}	0.3	0.33	0.000756	0.476	8.6	136

NRMSE: Error medio cuadrático normalizado, Min: mínimo, Max: Máximo, Dist.: Distancia.

En el Anexo 11 se presentan en extenso los valores de $UD_{1/4}$, CUC y eficiencia de aplicación obtenidos en las simulaciones bajo los criterios de error medio cuadrático normalizado mínimo ($NRMSE_{Min}$) y distancia máxima ($Dist_{Max}$). Estos valores fueron promediados por tratamiento y evento de fertirriego para obtener los datos presentados en los Cuadro 18, Cuadro 19 y Cuadro 21. Dichos valores se obtuvieron de simulaciones validadas bajos los criterios de error medio cuadrático normalizado mínimo ($NRMSE_{Min}$) y distancia máxima ($Dist_{Max}$).

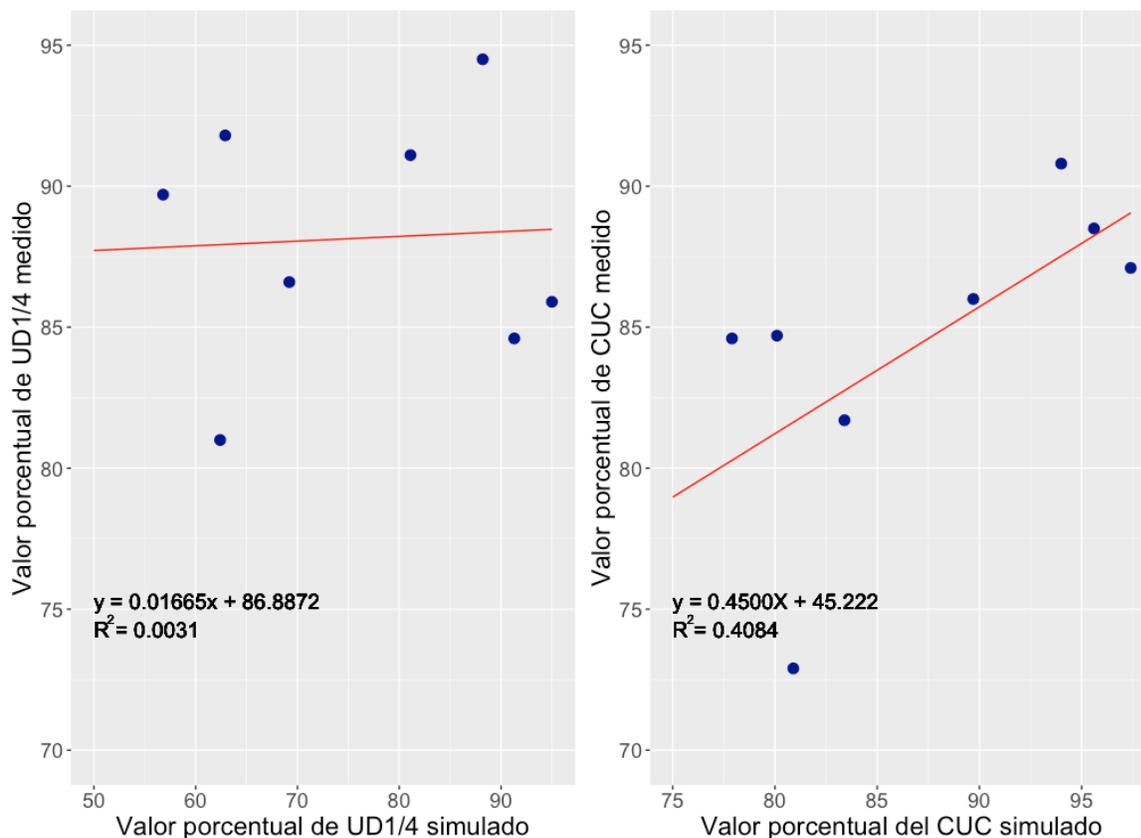


Figura 10. Relación entre los valores de $UD_{1/4}$ y CUC simulados con los observados.

Se evidencia la baja correlación entre los valores de $UD_{1/4}$ y una aparente correlación en los valores de CUC (Figura 10). Esta diferencia entre las tendencias de la $UD_{1/4}$ y CUC sugiere que ambos valores no necesariamente estén correlacionados o que puedan variar de manera independiente uno de otro. Mientras que el CUC es una medida de las desviaciones de la media (Maroufpoor *et al.*, 2010), la $UD_{1/4}$ por su parte indica la relación

entre el promedio de la fracción más baja, con respecto a la media general. En el Cuadro 19 se presentan los valores de $UD_{1/4}$ y CUC que se estimaron a partir de las determinaciones de urea en los surcos fertirregados y los obtenidos de la distribución de solutos estimados en las simulaciones de dos eventos de fertirriego utilizando el modelo Surcos (Burguete *et al.*, 2014).

Cuadro 19. Valores porcentuales de Uniformidad de la distribución en el cuarto más bajo ($UD_{1/4}$) y del coeficiente de uniformidad de Christiansen medidos y simulados en el segundo y tercer evento de fertirriego.

EF	Tiempo de fertirriego	Dosis de N	Simulados		Observados	
			$UD_{1/4}$	CUC	$UD_{1/4}$	CUC
2	100	161	95.0	97.4	85.9	87.1
		80.5	81.1	89.7	91.1	86
	50	161	62.9	80.1	91.8	84.7
		80.5	69.2	83.4	86.6	81.7
3	100	161	91.3	95.6	84.6	88.5
		80.5	88.2	94.0	94.5	90.8
	50	161	62.4	80.9	81	72.9
		80.5	56.8	77.9	89.7	84.6

EF: Número de evento de fertirriego, N: Nitrógeno.

Para corroborar estadísticamente las correlaciones se llevaron a cabo análisis de correlación entre los valores observados y simulados. De acuerdo con los estadísticos de regresión, la de valor de R^2 correlación entre los valores simulados y los observados de $UD_{1/4}$ y CUC es de 0.0031 y 0.407 respectivamente. Sin embargo, de acuerdo con el análisis de varianza de la regresión, ninguna de las dos regresiones fue significativa o válida. Por lo que se concluye que las simulaciones no reflejaron adecuadamente los valores observados en campo en los índices de uniformidad $UD_{1/4}$ y CUC (Cuadro 20).

La eficiencia de aplicación mostro una tendencia a tener mayores valores en los tratamientos donde el tiempo de fertirriego fue de 50 minutos, en comparación con los de 100 minutos (Cuadro 21). Es decir, que, a mayor tiempo de fertirriego, menor eficiencia de aplicación.

Cuadro 20. Estadísticas de regresión entre valores simulados y valores medidos de $UD_{1/4}$ y CUC de nitrógeno en el fertirriego.

Estadísticas	$UD_{1/4}$	CUC
R^2	0.0031	0.4084
R^2 ajustado	-0.1630	0.3099
Raíz MSE ¹⁷	4.75242	4.5191
Observaciones	8	8
F	0.02	4.14
F_c	0.8951 ^{NS}	0.0880 ^{NS}
Intercepción	86.88722	45.22215
Coefficiente de regresión	0.01665	0.44996

^{NS}, valores no significativos, alfa = 0.05, F_c : Valor crítico de F .

5.1.3. Eficiencia de aplicación del fertirriego

Moravejalahkami *et al.* (2012) informaron sobre los valores porcentuales de la eficiencia de aplicación de fertilizantes (complementarios a las pérdidas por escurrimiento) oscilan entre el 28,4 % y el 79,6 %. Los autores indican que el valor más bajo de eficiencia de aplicación se obtiene cuando se lleva a cabo el fertirriego con concentraciones constantes de fertilizante durante todo el tiempo de riego. Esto se debe que al incrementar el tiempo de fertirriego se disminuye la concentración de la solución nutritiva, lo que a su vez permite una mejor distribución a lo largo del surco, sin embargo, también incrementa el tiempo en el que el fertilizante escurre al final del surco, lo que permite que

¹⁷ Error típico

se pierda una mayor cantidad de fertilizante. Ebrahimian y Playán (2014) señalan que la eficiencia de aplicación de fertilizantes es menor cuando se reduce el tiempo de su aplicación. Los valores de eficiencia varían entre el 21,1 % y el 60,3 % en condiciones de campo y de 70.3 a 88.5 % en modelos de simulación. Estos valores se presentaron bajo condiciones en las que el fertirriego se llevó a cabo durante los primeros 180 minutos y los últimos 150 minutos de los 300 minutos¹⁸ totales de riego, es decir, en fertirriegos relativamente largos en comparación con la duración total del riego. Los datos obtenidos sobre la eficiencia de la aplicación son ilustrativos.

Cuadro 21. Valor porcentual de eficiencia de aplicación en el segundo y tercer evento de fertirriego.

Tratamiento	Evento de fertirriego		
	Segundo	Tercer	Promedio
T50N161	91.7	92.3	92.0
T50N80	89.9	86.2	88.0
T100N161	60.5	81.2	70.8
T100N80	85.9	80.0	82.9

Es importante tener en cuenta que, aunque se han validado las simulaciones, por sí solos no reflejan el comportamiento de la distribución en el campo. Por lo tanto, se deben interpretar con precaución, ya que la eficiencia de la aplicación no pudo validarse estadísticamente

5.2. Fertirriego y huella hídrica

Se estimó la huella hídrica utilizando el método desarrollado por Hoekstra *et al.* (2011), utilizando las funciones del modelo CropWat 8.0 (Smith, 1992) y la información climática de la estación meteorológica de Los Ídolos, ubicada en el municipio de Actopan, Veracruz (Servicio meteorológico nacional, n. d.). Los valores de agua evapotranspirada verde y azul corresponden a la evapotranspiración del cultivo y al requerimiento de riego,

¹⁸ El tiempo de riego varía en cada caso específico de acuerdo con las características físicas del suelo.

respectivamente. El cultivo de la caña de azúcar, bajo las condiciones de la región, requirió una lámina de 2112,1 mm, lo que equivale a 21121 m³ ha⁻¹ (Cuadro 22).

Cuadro 22. Agua verde y azul de la evapotranspiración basada en la tabla de resultado de requerimiento de agua del cultivo del CropWat 8.0.

Mes	Per.	Etapa	Kc	ETc mm/día	ETc	Prec. Efec.	Req. Riego	ET _{verde}	ET _{azul}
Jul	1	Inic	0.4	2.13	21.3	47.7	0	21.3	0
Jul	2	Inic	0.4	2.1	21	51.8	0	21	0
Jul	3	Des	0.4	2.11	23.2	48	0	23.2	0
Ago	1	Des	0.49	2.58	25.8	42.6	0	25.8	0
Ago	2	Des	0.63	3.32	33.2	39.3	0	33.2	0
Ago	3	Des	0.78	4	44	39.3	4.7	39.3	4.7
Sep	1	Des	0.92	4.64	46.4	41.2	5.3	41.1	5.3
Sep	2	Des	1.06	5.22	52.2	41.6	10.6	41.6	10.6
Sep	3	Med	1.2	5.68	56.8	35.3	21.6	35.2	21.6
Oct	1	Med	1.24	5.66	56.6	28	28.6	28	28.6
Oct	2	Med	1.24	5.44	54.4	22.3	32.1	22.3	32.1
Oct	3	Med	1.24	5.19	57.1	17.6	39.5	17.6	39.5
Nov	1	Med	1.24	4.93	49.3	12	37.3	12	37.3
Nov	2	Med	1.24	4.67	46.7	6.7	40	6.7	40
Nov	3	Med	1.24	4.47	44.7	5.8	38.9	5.8	38.9
Dic	1	Med	1.24	4.28	42.8	5.1	37.7	5.1	37.7
Dic	2	Med	1.24	4.08	40.8	3.5	37.3	3.5	37.3
Dic	3	Med	1.24	4.1	45.1	3.7	41.4	3.7	41.4
Ene	1	Med	1.24	4.12	41.2	4.2	37	4.2	37
Ene	2	Med	1.24	4.15	41.5	4.3	37.2	4.3	37.2
Ene	3	Med	1.24	4.38	48.2	4	44.2	4	44.2
Feb	1	Med	1.24	4.62	46.2	3.6	42.6	3.6	42.6
Feb	2	Med	1.24	4.86	48.6	3.2	45.3	3.3	45.3
Feb	3	Med	1.24	5.15	41.2	3.3	37.9	3.3	37.9
Mar	1	Med	1.24	5.45	54.5	3.3	51.2	3.3	51.2
Mar	2	Med	1.24	5.75	57.5	3.3	54.2	3.3	54.2
Mar	3	Fin	1.24	6.03	66.3	3.7	62.7	3.6	62.7
Abr	1	Fin	1.19	6.1	61	3.8	57.2	3.8	57.2
Total					1267.6	528.2	844.5	423.1	844.5

Per.: Periodo.

Como se observa en el Cuadro 23, 4231 m³ ha⁻¹ corresponden al volumen de agua verde, mientras que los restantes 8445 m³ ha⁻¹ son del volumen de agua azul, los cuales se cubrieron mediante el agua de riego (Hoekstra *et al.*, 2011).

Cuadro 23. Cálculo de uso de agua del cultivo (UAC) verde, azul y total a partir de los datos de los componentes de evapotranspiración verde y azul del requerimiento de agua del cultivo.

	ET mm	UAC m ³ ha ⁻¹
Verde	423.1	4231
Azul	844.5	8445
Total	1267.6	12676

UAC: uso de agua del cultivo, ET evapotranspiración.

Para estimar los valores de la huella hídrica, se calcularon los valores de uso de agua del cultivo (UAC) dividiéndolos por los valores de rendimiento de cada una de las unidades experimentales. A continuación, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una y dos vías, considerando cada combinación de factores y el testigo como tratamientos independientes para el caso de ANOVA de una vía. En el análisis de dos vías, se compararon la duración del fertirriego y la dosis de nitrógeno.

Los valores de la huella hídrica en la producción de caña de azúcar varían entre 172.6 y 203.5 m³ t⁻¹, según se muestra en el Cuadro 24. En promedio, se observa que la huella hídrica es mayor en el tratamiento de aplicación convencional de nitrógeno que en los demás tratamientos. El valor más bajo se obtiene en el tratamiento que combina una dosis de 80 kg N ha⁻¹ con un tiempo de fertirriego de 100 minutos. Además, se destaca que la huella hídrica aumenta a medida que la dosis de nitrógeno aumenta de 80 a 161 kg N ha⁻¹, es decir, un aumento de 8.4 m³ t⁻¹. De manera similar, la diferencia entre los tratamientos de duración del fertirriego de 50 y 100 minutos es de 31.51 m³ t⁻¹. Se encontró que solo el cambio en la dosis de nitrógeno y/o el tiempo de riego con fertilizante

produce diferencias significativas en la huella hídrica, ya que la diferencia entre el tratamiento convencional y la combinación con la huella hídrica más baja fue de 19 m³ t⁻¹. Esta diferencia si fue significativa indicando que, en cuanto huella hídrica, el fertirriego con tiempos de riego de 10 minutos y son mas eficientes en cuanto a huella hídrica que tiempos más prolongados, entendiendo que, a menor valor de huella hídrica, mayor eficiencia.

Cuadro 24. Huella hídrica total en la producción de caña de azúcar en Actopan, Veracruz bajo los tratamientos de dosis de nitrógeno y tiempo de fertirriego

Tiempo de fertirriego	Dosis de nitrógeno en fertirriego (DN) ^{NS}		
	80.5	161	\bar{x}
		m ³ t ⁻¹	
50	197.8	200	198.9 ^a
100	172.6	187.2	179.9 ^b
\bar{x}	185.2	193.6	
Convencional	-	203.5*	

*Tratamiento convencional de nitrógeno en caña de azúcar para la región; NS: no significativo.

Garay-Jácome *et al.* (2022) informaron que en la cuenca del Papaloapan, México, los valores de huella hídrica verde y azul oscilan entre 239 y 328 m³ t⁻¹, lo cual contrasta con los valores de 58.7 a 104.9 m³ t⁻¹ presentados por Haro *et al.* (2014). Los valores de huella hídrica en diferentes regiones están determinados por los rendimientos y la evapotranspiración. El primero depende principalmente de las características de los sistemas de producción, ya que tanto Jorrat *et al.* (2018) como Haro *et al.* (2014) indican que el factor tecnológico es determinante para lograr huellas hídricas más bajas. Mientras tanto, la evapotranspiración está determinada por las condiciones de temperatura y precipitación de las zonas productoras (Garay-Jácome *et al.*, 2022). Aunque los valores de huella hídrica estimados en el presente trabajo están dentro de los promedios citados por Garay-Jácome *et al.* (2022) para México, estos podrían ser mucho mayores si se considerara la eficiencia (o baja eficiencia) de los sistemas de riego

y las huellas hídricas generadas por el almacenamiento y transporte del agua en canales, los cuales pueden variar entre 356 y 1879 m³ t⁻¹ y 0.29 y 1.43 m³ t⁻¹, respectivamente (Yuguda *et al.*, 2020).

En conclusión, la huella hídrica es un indicador que refleja el impacto de las actividades productivas, no solo en el sector agrícola, sino en cualquier ámbito de la actividad humana. Esta huella representa la cantidad de agua consumida para diversos usos durante los procesos productivos y es una medida del gasto de agua necesario por unidad de medida de agua consumida por tonelada de caña de azúcar producida. En comparación, los valores de huella hídrica obtenidos en la evaluación del fertirriego (172.6 y 203.5 m³ t⁻¹) se encuentran por debajo de los valores estimados para la cuenca del Papaloapan en México, indicando una mayor. Sin embargo, estos valores todavía se consideran elevados debido a los reportes de huellas hídricas mucho más bajas por ejemplo 58.7 m³ t⁻¹ (Haro *et al.*, 2014).). Los agroecosistemas con caña de azúcar en el área de estudio presentan valores de huella hídrica elevados en comparación con otros cultivos y sistemas de producción. Por lo tanto, es necesario aumentar la productividad con el fin de reducir la huella hídrica. Es importante investigar los factores que contribuyen a la disminución reciente en la huella hídrica, tal como se indica en el Cuadro 7.

Cuadro 25. Eficiencia de uso de nitrógeno (EUN), Eficiencia de absorción de nitrógeno (EaN) y los componentes masa de producto de interés (Gw), nitrógeno de la planta (Nt) y nitrógeno del suelo (Ns) estimados en las unidades experimentales en el bloque uno.

DN	TF	Rend (Gw)	Nt	Ns**	EUN t kg⁻¹	EaN
161*	---	56.0	100.9	261.0	0.21	0.39
161	50	63.7	114.7	301.4	0.21	0.38
80.5	50	64.8	116.7	197.4	0.33	0.59
161	100	67.5	121.6	260.6	0.26	0.47
80.5	100	68.3	122.9	190.8	0.36	0.64

*Dosis convencional, **considerando la aplicación al suelo previa a los eventos de fertirriego.

5.3. Fertirriego y eficiencia de la fertilización

La eficiencia de la fertilización se estimó mediante dos parámetros: la eficiencia de uso de nitrógeno (EUN, Ecuación (5) y la eficiencia de absorción de nitrógeno (EaN, (6) en las muestras analizadas. Para el cálculo de EUN y EaN se utilizaron los datos de nitrógeno contenido en la planta (Nt), la masa del producto de interés (Gw) y el nitrógeno proveniente del suelo (Ns). Nt se estimó tomando la cantidad de kilogramos de nitrógeno extraídos por cada tonelada de caña cosechada multiplicada por el valor de extracción nutrimental de 1.8 kg N t^{-1} de producto cosechado de caña de azúcar (Castellanos *et al.*, 2010). Para el cálculo del nitrógeno proveniente del suelo (Ns), se consideró únicamente la cantidad aplicada en las dosis de fertilización.

Los valores de EUN varían de 0.21 - 0.36 toneladas de producto cosechado por kilogramo de nitrógeno aplicado ($\text{t kg}^{-1} \text{ N}$). y de 0.39 a 0.68 (adimensional) para EaN. Los valores más bajos de ambos índices corresponden al tratamiento convencional de fertilización, es decir, la dosis completa de nitrógeno aplicado de forma sólida al suelo. En promedio los tratamientos con dosis menores de nitrógeno mostraron valores más altos de EUN y EaN (Cuadro 25):

Los resultados muestran que, a menores dosis de nitrógeno y mayor tiempo de fertirriego, se alcanzan mayores valores de EUN y EaN, mientras que a dosis de 161 kg N ha^{-1} en fertirriego, los valores de eficiencia son equiparables al tratamiento convencional (Cuadro 26).

5.4. Rendimiento en función del tiempo y dosis de aplicación de nitrógeno en fertirriego

Producción por unidad de superficie del agroecosistema con caña de azúcar se muestra en el Anexo 7. Los valores de rendimiento se midieron en cada uno de los puntos de observación a lo largo de la parcela experimental. Antes de hacer el análisis basado en

el análisis de varianza y posterior comparación de medias, primero se comprobaron el ajuste de los datos a las pruebas de normalidad y homocedasticidad de varianzas.

La producción por unidad de superficie se midió a los 9 meses del ciclo de soca de la parcela donde se lleva a cabo la evaluación. A los datos se le practicaron análisis de varianza unidireccional y bidireccional. En el primero, se hizo el análisis considerando a los tratamientos como niveles de un solo factor con la finalidad de incluir al testigo. En el Anova bidireccional se compararon los valores de los factores tiempo de fertirriego y dosis de nitrógeno con dos niveles de cada uno

Cuadro 26. Eficiencia de uso de nitrógeno y eficiencia de absorción de nitrógeno como resultado de los niveles de dosis de nitrógeno y tiempo de fertirriego.

Tiempo de fertirriego	Dosis de nitrógeno en fertirriego (kg N ha ⁻¹)		
	80.5	161	\bar{x}
Eficiencia de uso de nitrógeno			
Fc	--	0.21	
50	0.33	0.21	0.27
100	0.36	0.26	0.31
\bar{x}	0.35	0.24	
Eficiencia de absorción de nitrógeno			
Fc	--	0.39	
50	0.59	0.38	0.49
100	0.64	0.47	0.56
\bar{x}	0.62	0.43	

Cuadro 27. Análisis de varianza bidireccional de rendimiento en función de la dosis de nitrógeno y tiempo de fertirriego.

F.V.	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
Tratamiento	4	1290.601340	322.650335	2.61	0.0433*

*y ns Significativo y no significativo al nivel de 0.05 respectivamente.

De acuerdo con los resultados del análisis de varianza (Cuadro 27), al menos uno de los tratamientos tuvo un efecto diferente al de los demás sobre la producción por unidad de área de caña de azúcar. Al realizar la comparación de medias se observa que los tratamientos que consideraban un tiempo de fertirriego de 100 minutos tienen rendimientos mayores con respecto a los tratamientos de 50 minutos y el testigo, al que se le aplicó una fertilización convencional.

A su vez, los tratamientos de tiempo de fertirriego de 50 minutos no fueron estadísticamente distintos al tratamiento convencional. Los tratamientos de dosis de 80.5 kg N ha⁻¹ sumados a la fertilización inicial dados a la parcela suman un total de 180.5 kg N ha⁻¹, lo cual en comparación con la dosis convencional de nitrógeno (261 kg N ha⁻¹), plantea una reducción del 30.8 % (Cuadro 28).

Cuadro 28. Rendimiento promedio de caña de azúcar y grupos de la comparación entre tratamientos.

Tratamiento	Rendimiento (t ha ⁻¹)
T100N80.5	75.36 ^a
T100N161	69.35 ^{ab}
T50N80.5	66.22 ^b
T50N161	65.73 ^b
Convencional	63.34 ^b

Letras diferentes entre tratamiento indican diferencias estadísticas significativas (Duncan, P < 0.05).

Es decir, que, de acuerdo con los resultados del experimento, al reducir las dosis de nitrógeno, por lo menos se mantienen los rendimientos en comparación con la dosis convencional, además es posible obtener rendimientos mayores. De acuerdo con la comparación de medias, mostrado en el Cuadro 28 con 100 minutos de TF y una DN de 80 kg N ha⁻¹ en fertirriego se alcanzó el mayor rendimiento, siendo superior al tratamiento

de fertilización convencional por 12.02 toneladas. Con respecto a los resultados del análisis de varianza de dos vías, cuyos resultados se presentan en el Cuadro 29, se observa que el valor de $Pr > F$ (Duncan) es no significativo para la variable dosis de nitrógeno en fertirriego (DN), mientras que la diferencia si fue significativa para el factor tiempo de fertirriego (TF).

Cuadro 29. Análisis de varianza bidireccional de rendimiento en función de la dosis de nitrógeno y tiempo de fertirriego.

F.V.	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
DN	1	158.5	158.5	1.10	0.2983 ^{ns}
TF	1	611.4	611.4	4.25	0.0440*
DN*TF	1	114.3	114.3	0.80	0.3765 ^{ns}

*, ns: Significativo y no significativo al nivel de 0.05 respectivamente.

Cuadro 30. Producción en toneladas por hectárea de caña de azúcar bajo los tratamientos de dosis de nitrógeno y tiempo de fertirriego.

Tiempo de fertirriego (min)	Dosis de nitrógeno en fertirriego		
	80.5	161	\bar{x}
Fc	--	63.35	
50	66.22	65.73	65.97 ^b
100	75.37	69.36	72.36 ^a
\bar{x}	70.79	67.54	

Fc: Fertilización convencional. Letras diferentes entre tratamiento indican diferencias estadísticas significativas (Duncan, $P < 0.05$).

Lo anterior indica que estadísticamente, los valores medios de rendimiento son diferentes entre los tratamientos de tiempo de fertirriego. El valor de rendimiento es mayor en 6.39

t ha⁻¹ con respecto a los tratamientos de 50 minutos de fertirriego. Mientras que la diferencia entre dosis de fertilización en fertirriego es diferente en 3.25 toneladas la cual no es significativa (Cuadro 30). La interacción entre las variables evaluadas tiempo y dosis de nitrógeno en fertirriego no fue significativa por lo que se descarta la interacción entre ambos factores. El fertirriego en caña de azúcar ha sido estudiado en sistemas de riego presurizado como el riego por goteo y por aspersión (Cuadro 6), y pocas veces en sistemas de riego por surcos. Abdel Wahab (2014) comparó diferentes duraciones de inyección del fertilizante disuelto. En sus conclusiones sostienen que con la inyección del fertilizante continua durante todo el tiempo de riego se logra un mayor rendimiento en 8.6 t ha⁻¹, con respecto a la aplicación mecánica de urea en el cultivo de caña de azúcar y de 1.6 t ha⁻¹ con respecto a la inyección de fertilizante durante la mitad del tiempo de riego. Sin embargo, su análisis carece de validación estadística. En el presente trabajo, se implementó un diseño experimental con repeticiones, lo cual permitió hacer análisis de varianza para validar las diferencias en los tratamientos. Se valida que el tiempo de fertirriego durante el mayor tiempo permite obtener mayores rendimientos en caña de azúcar comparados con una duración de fertirriego menores (50 min), y un tratamiento convencional. Por otro lado, Abbasi *et al.* (2015) compararon el efecto de dosis de nitrógeno crecientes y número de fraccionamientos en fertirriego por surcos en caña de azúcar. En sus resultados no se encontró diferencias significativas entre las dosis de nitrógeno, pero si entre el número de fraccionamientos de las dosis sobre el rendimiento. Entre mayor el número en que se dividen las dosis de nitrógeno, mayor fue el rendimiento. Estos autores concluyen que dividir la aplicación del nitrógeno en fertirriego en tres eventos puede ser plausible debido a ventajas operativas y establecer dosis menores a las tradicionales también pueden tener ventajas económicas y ambientales. Inclusive sus datos también muestran, que, a mayores dosis de nitrógeno, los rendimientos tienden a disminuir (sin que hubiera diferencias significativas).

En conclusión, el tiempo de fertirriego tiene un efecto significativo sobre el rendimiento. El rendimiento se incrementa en promedio 6.39 t ha⁻¹ en los tratamientos de TF 100 minutos con respecto a los tratamientos con TF 50 minutos. No hay efecto significativo de la variable dosis de nitrógeno. El rendimiento es mayor con dosis de nitrógeno en

fertirriego de 80.5 kg N ha⁻¹ comparado con los tratamientos de 161.5 kg N ha⁻¹. No hay interacción entre las variables tiempo de fertirriego y dosis de nitrógeno sobre la variable producción de caña de azúcar por unidad de superficie. El mejor tratamiento fue el que combinaba dosis de nitrógeno total de 180.5 kg N ha⁻¹, siendo estadísticamente diferente y con un rendimiento mayor en 12.02 t ha⁻¹ con respecto al tratamiento de aplicación convencional de 261 kg N ha⁻¹, representando un incremento del 18.9 % en producción y 30% menos en necesidades de nitrógeno, o dicho de otra manera, 50% menos de inversión en urea aplicada en fertirriego, manteniendo la fórmula de la primer fertilización al inicio del ciclo de cultivo (Cuadro 8).

5.5. Análisis económico de las dosis de fertilización

Durante los años 2021 y 2022, en que se llevó a cabo el experimento coincidió con diversos eventos internacionales que provocaron un aumento desmedido en el precio de los fertilizantes.

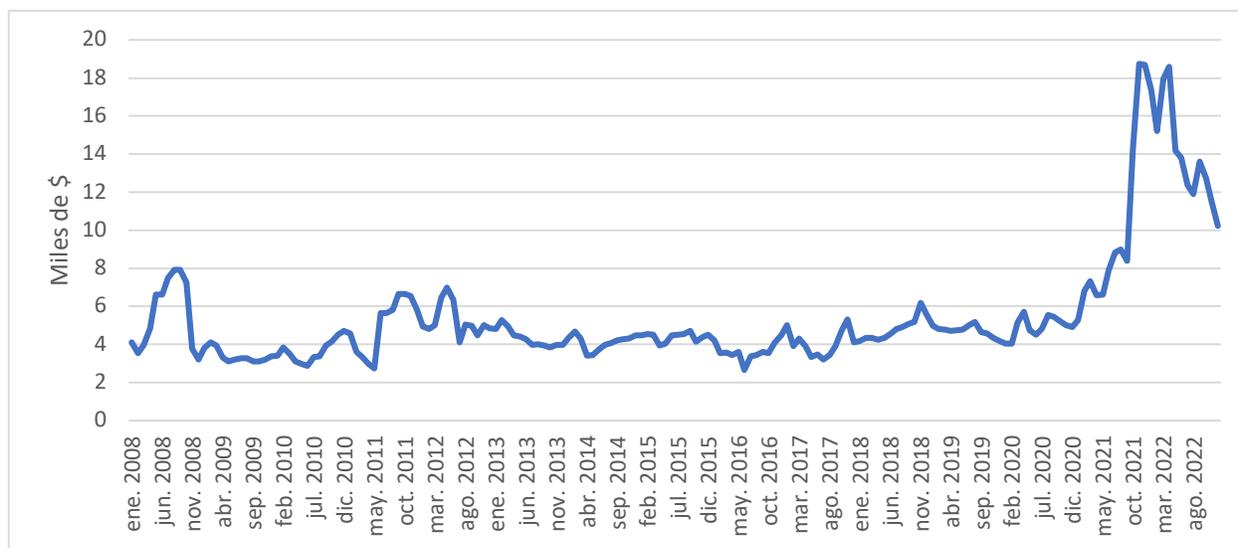


Figura 11. Precios de la tonelada de urea a granel desde enero de 2009 a diciembre de 2022.

Durante los últimos 15 años, el precio de los fertilizantes en México se mantuvo por debajo de los \$8000.00 pesos mexicanos por tonelada de urea, sin embargo, en junio de

2021, el precio aumentó hasta alcanzar un máximo de \$18,741.81 según lo reportado (INDEX MUNDI, 2023)¹⁹.. En marzo de 2022, el precio de la urea pasó de \$8,000.00 t⁻¹ a \$23,000.00 t⁻¹ según lo documentado (Suárez, 2022). Es decir, el precio de la urea se incrementó desde \$400.00 a \$1,150 por bulto de 50 kg. Este aumento de precio supuso una diferencia de \$750 por bulto. Si el precio se hubiera mantenido en \$400.00 por bulto, el costo de la urea requerida por hectárea (Cuadro 8) sería de \$2,800.00. Sin embargo, con el incremento del precio, dicho costo se elevó hasta los \$8,050.00. Con la aplicación de dosis reducidas de nitrógeno (80.5 kg ha⁻¹) en fertirriego, se plantea una disminución del 50% de la urea requerida, lo que reduce el impacto.

El precio con el cual se paga la caña de azúcar a los productores varía año con año y de factoría a factoría, debido a que se calcula con base en el precio de referencia del azúcar y a la eficiencia en campo y fábrica de cada ingenio (Secretaría de Economía, 2022). Para la zafra 2021-2022, el precio final pagado a los productores de caña de azúcar fue de alrededor de \$950.00. Este valor se tomó para hacer estimaciones de ingresos por venta de caña de azúcar y comparar el impacto económico del fertirriego (Cuadro 31).

Cuadro 31. Rendimiento, ingresos, costo de fertilizantes y comparativa de ingresos con respecto al tratamiento de fertilización convencional de los tratamientos de fertirriego.

Tratamiento	Rendimiento t ha ⁻¹	Ingresos estimados	Ingresos vs conv.	Ahorro en el costo de urea	Beneficio del tratamiento
T100N80.5	75.36	\$ 71 592.0	\$ 11 419.0	\$ 4 025.0	\$ 15 444.0
T100N161	69.35	\$ 65 882.5	\$ 5 709.5	\$ 0	\$ 5,709.5
T50N80.5	66.22	\$ 62 909.0	\$ 2 736.0	\$ 4 025.0	\$ 6,761.0
T50N161	65.73	\$ 62 443.5	\$ 2 270.5	\$ 0	\$ 2,270.5
Conv.	63.34	\$ 60 173.0	\$ -	\$ -	\$ -

Conv.: Fertilización convencional de 261 kg N ha⁻¹, en forma sólida en dos aplicaciones.

¹⁹Descripción dada: Urea, (mar negro), a granel, spot, f.o.b. mar negro (principalmente Yuzhnyy) desde Julio 1991.

El Cuadro 31 muestra la diferencia en términos financieros estimados entre los tratamientos de fertilización con fertirriego y el tratamiento de fertilización convencional. Con base en los rendimientos obtenidos, se observa que la implementación del fertirriego se justifica económicamente. Este beneficio es aún mayor en los tratamientos con dosis reducidas de nitrógeno. La diferencia en ingresos económicos entre el tratamiento combinado con dosis de nitrógeno de 80.5 kg N ha⁻¹.

En conclusión, con la implementación del fertirriego, se logra incrementar la producción por unidad de superficie y reducir los costos por adquisición de urea en 50%, lo que se traduce en un aumento de ingresos con respecto al tratamiento de fertilización convencional de \$15,444.00 por hectárea.

5.6. Rendimiento en función de la uniformidad

Debido a la imposibilidad de realizar una estimación de la uniformidad en la totalidad de las parcelas en los tres eventos de fertirriego que se llevaron a cabo, se hizo la comparación entre la producción por unidad de superficie de cada parcela en función de la UD $\frac{1}{4}$ y de la CUC de nitrógeno amoniacal en todas las parcelas en el primer evento de fertirriego. Por otro lado, se hizo la comparación en los tres eventos de fertirriego, pero solo en el bloque número uno (Cuadro 32).

El modelo de regresión que describe el rendimiento en función de la UD $\frac{1}{4}$ es válido solamente cuando la comparación se hace considerando los tres bloques en el primer evento de fertirriego. En esta comparación, el valor de Fc es menor a 0.05, indicando que se rechaza la hipótesis nula (H_0 : El modelo de regresión no es válido) en favor de la hipótesis alternativa (H_a : El modelo de regresión es válido) y, por lo tanto, las variables UD $\frac{1}{4}$ y rendimiento esta relacionadas. De la misma forma, el modelo que describe el rendimiento en función del CUC en su análisis de varianza el modelo también es válido ($F_c < 0.05$). Para los casos de las regresiones del rendimiento en función de la UD $\frac{1}{4}$ y la CUC promedio de los tres eventos de fertirriego en el bloque uno, no son válidos estadísticamente.

Cuadro 32. Estadísticas de regresión del rendimiento en función de los indicadores de uniformidad en la distribución de nitrógeno amoniacal observado.

Estadísticas	Entre bloques ²⁰		Entre eventos ²¹	
	UD _¼	CUC	UD _¼	CUC
R ²	0.4159	0.4596	0.7439	0.8761
R ² ajustado	0.3575	0.4056	0.6159	0.8142
Error típico	3.1834	3.0620	2.0823	1.4480
Observaciones	12	12	4	4
F	7.1210	8.5065	5.8107	14.15264511
F _c	0.0235*	0.0153*	0.1374	0.063954451
Intercepción	22.0847	32.2061	-37.5195	-16.810119
Coefficiente de regresión	0.5027	0.3989	1.1721	0.9749562

* El modelo es válido con una significancia 0.05, F_c: Valor crítico de F.

La correlación entre los valores de rendimiento y los índices de uniformidad se muestra de manera gráfica en la Figura 12. Se observa que el rendimiento se incrementa proporcionalmente al valor porcentual del UD_¼ y CUC. Dicho comportamiento se ha relacionado con el hecho de que un menor valor de uniformidad significa que hay partes del surco en que el nitrógeno pudo haberse retenido en cantidades deficitarias, mientras que otras partes pudieron haber tenido excesos, dicho problema al disminuir se incrementa la uniformidad (Solomon, 1984; Nair *et al.*, 2013). Pero solamente los modelos mostrados en la Figura 12a son válidos, es decir, el rendimiento está relacionado a la UD y la CUC en el primer evento de fertirriego en los tres bloques.

De manera análoga a la uniformidad en la distribución del agua en riego, donde a mayor uniformidad se espera mayores rendimientos (Solomon, 1984; Nair *et al.*, 2013), la distribución de fertilizantes se supone impacte de forma positiva en rendimientos explicado por la mayor uniformidad en el crecimiento de los cultivos a lo largo de las

²⁰En el primer evento de fertirriego en los tres bloques.

²¹Considerando sólo el bloque uno en los tres eventos de fertirriego.

parcelas (Playán y Faci, 1997; Ebrahimian *et al.*, 2014). Aunque agronómicamente, esto ha sido poco evaluado, los resultados del presente trabajo podrían ser una confirmación de dicha suposición. De acuerdo con el análisis de correlación realizado entre el rendimiento de caña de azúcar obtenido con los valores de uniformidad UD $\frac{1}{4}$ y CUC, presentan correlaciones válidas ($F_c < F$). Con valores de R^2 que varían entre 0.35 – 0.81 y coeficientes de regresión de 0.39 y 1.17. La razón por la cual los modelos de regresión de los rendimientos en función de los índices de uniformidad en los tres eventos de fertirriego se deban a la escasez de datos, ya que estos se realizaron con tan solo cuatro puntos por regresión, incrementando su incertidumbre final.

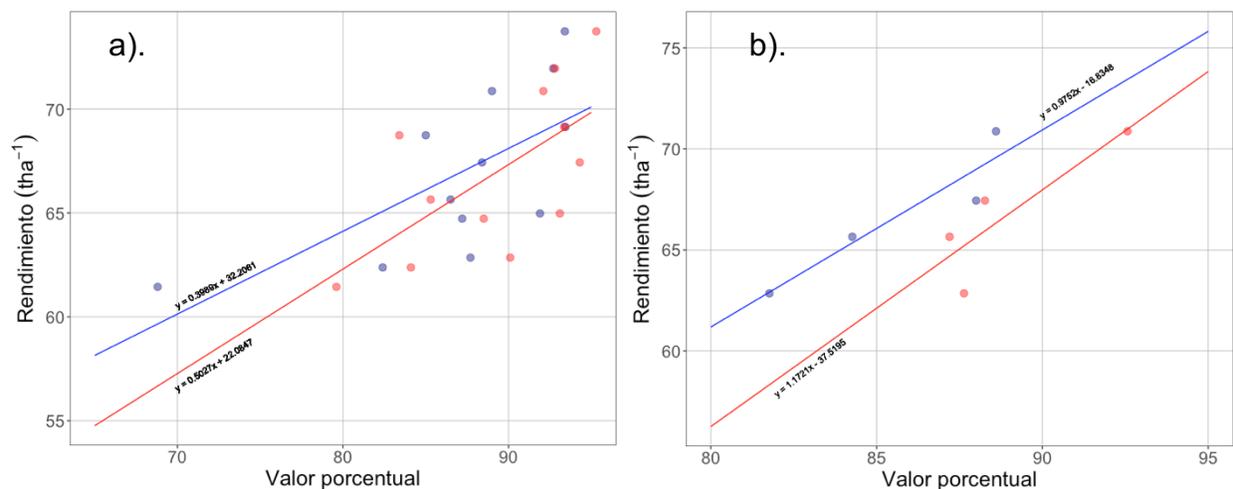


Figura 12. Relación entre la producción por unidad de superficie con la uniformidad de la distribución del cuarto más bajo (UD $\frac{1}{4}$ ----) y el coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC ----) de nitrógeno amoniacal del suelo en todas las parcelas del primer evento de fertirriego (a) y en la parcela número uno en los tres eventos de fertirriego (b).

Matemáticamente tanto la UD como CUC tiene su límite en el valor de 100%, el cual puede ser alcanzado extendiendo el tiempo de fertirriego junto con el riego, sin embargo, y como se muestra en la Figura 13, tanto la eficiencia de aplicación, como la eficiencia de uso de nitrógeno se ven disminuidos (Zerihun *et al.*, 2003). La UD y la CUC son inversamente proporcionales a la eficiencia, es decir que a medida que los índices de uniformidad se incrementan, la eficiencia de aplicación disminuye. En un caso extremo,

al extenderse el tiempo de fertirriego al infinito, la uniformidad ya no pasará de 100 %, sin embargo, la eficiencia si cae a medida que se incrementa el tiempo de fertirriego.

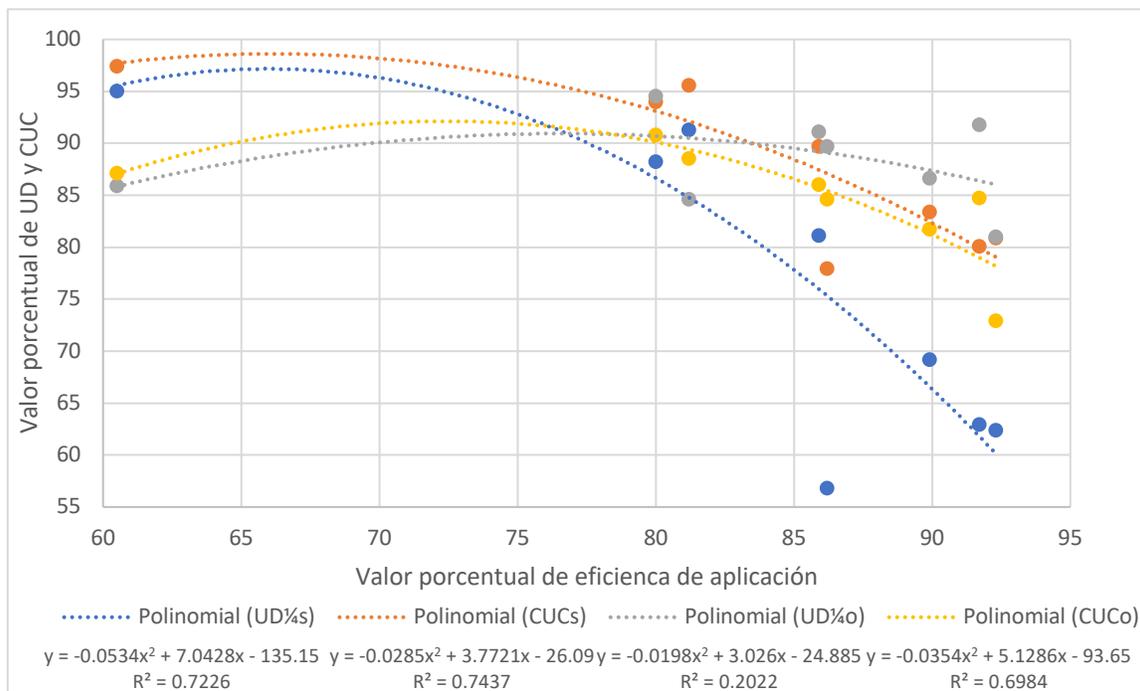


Figura 13. Valores de UD_¼ y CUC simulados (s) y observados (o) en función de la eficiencia de aplicación.

Después de analizar los datos, se concluye que, se encontró una relación significativa entre el rendimiento y los índices de uniformidad UD_¼ y CUC solo cuando se consideraron los datos de todas las parcelas en los tres bloques en el primer evento de fertirriego. Y no se encontró una relación significativa entre el rendimiento y los índices de uniformidad promedio de los tres eventos de fertirriego en los tratamientos de la parcela uno.

En general, la hipótesis de la relación entre el rendimiento y los índices de uniformidad UD_¼ y CUC se acepta parcialmente. No obstante, se requiere de una mayor investigación para establecer una conclusión definitiva.

5.7. Contratación de hipótesis

1. Con base en los datos obtenidos de mediciones de campo y simulaciones se observa que la eficiencia del fertirriego, a través del coeficiente de uniformidad de Christiansen y de la uniformidad de la distribución, presenta una tendencia a incrementarse en la medida que se incrementa el tiempo de fertirriego, sin embargo, dichos valores no fueron estadísticamente diferente entre los tiempos de fertirriego ni entre las dosis de nitrógeno, por lo tanto, se rechaza la hipótesis particular uno, independientemente de si se llevan a cabo los fertirriegos en periodos de tiempo 50 o 100 minutos.
2. La eficiencia en el uso del agua, medida a través de la huella hídrica, y la eficiencia en el uso del nitrógeno fertilizante son mayores en los tratamientos con dosis de 80 kg N ha⁻¹ y un tiempo de fertirriego de 100 minutos. Sin embargo, estas diferencias no fueron validadas estadísticamente, por lo tanto, la hipótesis particular dos no puede ser ni rechazada ni aceptada.
3. La tercera hipótesis ha sido aceptada parcialmente después de haber evaluado los resultados obtenidos en el estudio. Se ha determinado que la producción por unidad de superficie en el agroecosistema de la caña de azúcar de acuerdo con el análisis de dos vías está directamente relacionada con el tiempo de duración del fertirriego y los índices de uniformidad de dicho proceso, pero no con la dosis de nitrógeno aplicado. Por otro lado, de acuerdo con el análisis estadístico de una vía, el tratamiento consistente en 100 minutos de tiempo de fertirriego y dosis de nitrógeno en fertirriego de 80.5 kg N ha⁻¹ es estadísticamente mayor que los tratamientos tiempos de fertirriego de 50 minutos y el convencional (12.02 t ha⁻¹).

VI. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la presente tesis aportan información valiosa en relación con la aplicación de fertilizantes en sistemas de fertirriego de baja presión y multicompuerta. Uno de los aspectos más relevantes del estudio es que se aborda la problemática de la falta de consenso respecto al mejor momento para inyectar los fertilizantes en este tipo de sistemas. Algunas referencias sugieren que la mejor opción es hacerlo al comienzo del riego, mientras que otras sugieren hacerlo al final o incluso durante todo el proceso. Se demuestra estadísticamente que no existe una diferencia significativa entre el momento de inyección de los fertilizantes y la dosis de nitrógeno aplicada en cuanto a los índices de distribución, como la uniformidad de la distribución (UD) y el coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC). Pero si sobre la producción por unidad de superficie de caña de azúcar.

Los resultados indican que la eficiencia del fertirriego en surcos está relacionada con el tiempo de duración del proceso, así como con los índices de uniformidad de la distribución del fertilizante. En otras palabras, el rendimiento de los cultivos de caña de azúcar está directamente relacionado con la duración del fertirriego y la uniformidad en la distribución del fertilizante, aunque esto último no es concluyente y hace falta investigarlo más.

Asimismo, se observó que los índices de uniformidad son un factor importante para considerar en el fertirriego en surcos y su relación con el rendimiento del cultivo de caña de azúcar. Los resultados sugieren que un tiempo de fertirriego más prolongado puede mejorar la uniformidad de la distribución de fertilizantes y, por lo tanto, aumentar la eficiencia del fertirriego y mejorar el rendimiento del cultivo.

Además, es importante destacar que este estudio se realizó en campo durante todo un ciclo de cultivo, lo cual permite obtener conclusiones basadas en observaciones empíricas y datos reales, en lugar de basarse únicamente en simulaciones

computarizadas o en un solo evento de fertirriego. Esto proporciona una visión más completa y precisa de los resultados y su aplicabilidad en el campo.

En general, los resultados de esta investigación contribuyen significativamente al conocimiento actual sobre el fertirriego en surcos y su impacto en la producción de caña de azúcar. Los hallazgos indican que la implementación de un sistema de fertirriego de baja presión y multicompuerta es factible y eficiente, ya que puede mejorar la eficiencia en el uso de fertilizantes y reducir el requerimiento de nitrógeno fertilizante, lo que a su vez puede contribuir a la sostenibilidad del sistema de cultivo.

Finalmente, este estudio ofrece información valiosa para los agricultores, agrónomos e investigadores que trabajan en el campo del fertirriego y la producción de caña de azúcar. Y, proporciona una base sólida para futuras investigaciones que podrían profundizar en los factores que influyen en la producción del cultivo y mejorar aún más la eficiencia y la sostenibilidad de los sistemas de fertirriego de baja presión y multicompuerta.

VII. LITERATURA CITADA

- Abbasi, F., Adamsen, F. J., Hunsaker, D. J., Feyen, J., Shouse, P., and van Genuchten, M. Th. (2003). Effects of Flow Depth on Water Flow and Solute Transport in Furrow Irrigation: Field Data Analysis. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(4), 237-246. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2003\)129:4\(237\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:4(237))
- Abbasi, F., Dashtgol, A. S., Salamati, N. (2015). Mejorando la eficiencia en el uso del agua y fertilizantes en fertirriego en surcos en caña de azúcar. *Journal of Water and Soil*, 29, 933-942.
- Abbasi, F., Rezaee, H. T., Jolaini, M., Alizadeh, H. A. (2012). Evaluation of fertigation in different soils and furrow irrigation regimes. *Irrigation and Drainage*, 61, 533-541. <https://doi.org/10.1002/ird.1646>
- Abbasi, F., Simunek, J., van Genuchten, M. Th., Feyen, J., Adamsen, F. J., Hunsaker, D. J., Strelkoff, T. S., Shouse, P. (2003). Overland water flow and solute transport: Model development and field-data analysis. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129, 71-81. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2003\)129:2\(71\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:2(71))
- Abbasi, Y., Abbasi, F., Liaghat, A., Alizadeh, H. A. (2012). Evaluation of furrow fertigation and model validation on maize field. *Irrigation and Drainage Systems*, 25, 279-291. <https://doi.org/10.1007/s10795-012-9124-7>
- Abdel Wahab, D.A.M. (2014). Introduction of Fertigation in Sugarcane Production for Optimization of Water and Fertilizers Use. *Agricultural Sciences*, 5, 945–957. <https://doi.org/10.4236/as.2014.511102>
- Adviento-Borbe, M.A.A., Barnes, B.D., Iseyemi, O., Mann, A.M., Reba, M.L., Robertson, W.J., Massey, J.H., Teague, T.G. (2018). Water quality of surface runoff and lint yield in cotton under furrow irrigation in Northeast Arkansas. *Science of The Total Environment*, 613–614, 81–87. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.020>
- Akhtar, M., Yaqub, M., Naeem, A., Ashraf, M., Hernández, V.E. (2016). Improving phosphorus uptake and wheat productivity by phosphoric acid application in alkaline calcareous soils: Phosphorus uptake and wheat productivity. *Journal of Science and Food Agriculture*, 96, 3701–3707. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7555>

- Altieri, M.A. (2002). Agroecology: the science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 93, 1-24. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(02\)00085-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(02)00085-3).
- Altieri, M.A. (1995) *Agroecology: the science of sustainable agriculture*, 2nd ed. Boulder, Colo. : London: Westview Press; IT Publications.
- Antille, D.L. (2018). Evaluation of Fertigation Applied to Furrow and Overhead Irrigated Cotton Grown in a Black Vertosol in Southern Queensland, Australia. *Applied Engineering in Agriculture*, 34, 197-211. <https://doi.org/10.13031/aea.12519>.
- Arnold, M. and Osorio, F. (1998). Introducción a los Conceptos Básicos de la Teoría General de Sistemas. *Cinta de Moebio*, 3, 40-49.
- ASALE, RAE (2022). 'Sustentable. Diccionario de la lengua española - Edición del Tricentenario. <https://dle.rae.es/sustentable>.
- Badr, M.A., Abou Hussein, S.D., El-Tohamy, W.A. and Gruda, N. (2010). Nutrient uptake and yield of tomato under various methods of fertilizer application and levels of fertigation in arid lands. *Gesunde Pflanzen*, 62, 11-19. <https://doi.org/10.1007/s10343-010-0219-5>.
- Bai, M., Xu, D., Zhang, S. and Li, Y. (2013). Spatial-temporal distribution characteristics of water-nitrogen and performance evaluation for basin irrigation with conventional fertilization and fertigation methods. *Agricultural Water Management*, 126, 75-84. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.05.006>.
- Barbosa, E.A.A., Matsura, E.E., dos Santos, L.N.S., Gonçalves, I.Z., Nazário, A.A. and Feitosa, D.R.C. (2017). Water footprint of sugarcane irrigated with treated sewage and freshwater under subsurface drip irrigation, in Southeast Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 153, 448-456. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.167>.
- Barideh, R., Besharat, S., Morteza, M. and Rezaverdinejad, V. (2018). Effects of Partial Root-Zone Irrigation on the Water Use Efficiency and Root Water and Nitrate Uptake of Corn. *Water*, 10, 526. <https://doi.org/10.3390/w10040526>.
- Barrantes Aguilar, L.E., González Estrada, A., Martínez Damián, M.Á., Valdivia Alcalá, R. (2020). Modelos de regresión segmentada para estimar el tamaño óptimo de la parcela experimental con caña de azúcar. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11, 1763–1773. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i8.1934>

- Bautista, E., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., Schlegel, J. (2009). Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR. *Agricultural Water Management*, 96, 1146–1154. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.007>
- Belcher, K.W., Boehm, M.M., Fulton, M.E. (2004). Agroecosystem sustainability: a system simulation model approach. *Agricultural Systems*, 79, 225–241. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(03\)00072-6](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(03)00072-6)
- Boschiero, B.N., Mariano, E., Trivelin, P.C.O. (2018). “Preferential” ammonium uptake by sugarcane does not increase the 15N recovery of fertilizer sources. *Plant Soil*, 429, 253–269. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3672-z>
- Brunetti, G., Šimůnek, J., Bautista, E. (2018). A hybrid finite volume-finite element model for the numerical analysis of furrow irrigation and fertigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 150, 312–327. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.013>
- Burguete, J., Lacasta, A., García-Navarro, P. (2014). SURCOS: A software tool to simulate irrigation and fertigation in isolated furrows and furrow networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 103, 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.02.004>
- Burt, C.M., Clemmens, A.J., Solomon, K.H. (1995). Identification and Quantification of Efficiency and Uniformity Components. In *Proceedings of the ASCE Water Conference in San Antonio, Texas*. ASCE Water Conference, San Antonio, Texas, 1526–1530.
- Calderón-Bolaina, V. (2018). Espacio territorial de sentido en agroecosistemas con cacao en Tabasco, México (Tesis doctoral). Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Manlio Fabio Altamirano, Veracruz, México.
- Caporali, F. (2007). Agroecology as a science of integration for sustainability in agriculture. *Ital J Agronomy*, 2, 73. <https://doi.org/10.4081/ija.2007.73>
- Casanova, L., Martínez, J., López, S., and López, G. (2016). De von Bertalanffy a Luhmann: Deconstrucción del concepto “agroecosistema” a través de las generaciones sistémicas. *Revista Mad. Revista del Magíster en Análisis Sistémico Aplicado a la Sociedad*, 60-74.

- Casanova-Pérez, L., Martínez-Dávila, J.P., López-Ortiz, S., Landeros-Sánchez, C., López-Romero, G., and Peña-Olvera, B. (2017). El agroecosistema comprendido desde la teoría de sistemas sociales autopoiéticos. *Remexca*, 6, 855. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i4.625>
- Castellanos, J.Z., Uvalle-Bueno, J.X., and Aguilar-Santelises, A. (2010). Manual de interpretación de análisis de suelo y agua. Segunda. ed, Colección Incapa. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola, México.
- Castro-Gerardo, G.A., Landeros-Sánchez, C., Martínez-Dávila, J.P., Castañeda-Chávez, M.R., López-Romero, G., Carrillo-Ávila, E., and Hernández-Pérez, J.M. (2020). Concentration and distribution of heavy metals in ash emitted by the sugar factory La Gloria, Veracruz, Mexico. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36, 275-285. <https://doi.org/10.20937/RICA.53404>
- Causapé, J., Quílez, D., and Aragüés, R. (2004). Assessment of irrigation and environmental quality at the hydrological basin level: II. Salt and nitrate loads in irrigation return flows. *Agricultural Water Management*, 70, 211-228. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.06.006>
- Chen, G.-F., Tang, Q.-Z., Li, Y.-R., Huang, Y.-Y., Liu, B., Xu, L., and Huang, H.-R. (2012). Effects of Sub-soil Drip Fertigation on Sugarcane in Field Conditions. *Sugar Tech*, 14, 418-421. <https://doi.org/10.1007/s12355-012-0173-x>
- Chimonyo, V.G.P., Wimalasiri, E.M., Kunz, R., Modi, A.T., and Mabhaudhi, T. (2020). Optimizing Traditional Cropping Systems Under Climate Change: A Case of Maize Landraces and Bambara Groundnut. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.562568>
- Comité Nacional Para el Desarrollo Sustentable de la caña de Azúcar, 2018. Panorama de la investigación de la agroindustria de la caña de azúcar (Reporte de proyecto No. 2018). Sagarpa, México, D.F.
- Comisión Nacional del Agua, 2023. Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego. [Online] Disponible en: https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EADR_2017-18.pdf [Accedido el 1 de marzo de 2023].
- Conway, G.R., 1985. Agroecosystem analysis. *Agricultural administration* 20, 1–55.

- Cruz-Bautista, P., Martínez-Dávila, J.P., Osorio-Acosta, F., López-Romero, G., Estrella, N., 2017a. Marco epistémico para estudiar los agroecosistemas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8, 159–170.
- Cruz-Bautista, P., Martínez-Dávila, J.P., Osorio-Acosta, F., López-Romero, G., Estrella-Chulín, N., Regalado-López, J., 2017b. Marco epistémico para estudiar los agroecosistemas* Epistemic framework for studying agroecosystems. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8, 159–170.
- Cutz-Pool, L.Q., Palacios-Vargas, J.G., Castaño-Meneses, G., García-Calderón, N.E., 2007. Edaphic Collembola from two agroecosystems with contrasting irrigation type in Hidalgo State, Mexico. *Applied Soil Ecology* 36, 46–52. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2006.11.009>
- Doré, T., Makowski, D., Malézieux, E., Munier-Jolain, N., Tchamitchian, M., Tittone, P., 2011. Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: Revisiting methods, concepts and knowledge. *European Journal of Agronomy* 34, 197–210. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.02.006>
- Ebrahimian, H., 2014. Soil infiltration characteristics in alternate and conventional furrow irrigation using different estimation methods. *KSCE J Civ Eng* 18, 1904–1911. <https://doi.org/10.1007/s12205-014-1343-z>
- Ebrahimian, H., Keshavarz, M.R., Playán, E., 2014. Surface fertigation: a review, gaps and needs. *Span J Agric Res* 12, 820. <https://doi.org/10.5424/sjar/2014123-5393>
- Ebrahimian, Hamed, Liaghat, A., Parsinejad, M., Playán, E., Abbasi, F., Navabian, M., 2013. Simulation of 1D surface and 2D subsurface water flow and nitrate transport in alternate and conventional furrow fertigation. *Irrig Sci* 31, 301–316. <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0303-3>
- Ebrahimian, H., Liaghat, A., Parsinejad, M., Playán, E., Abbasi, F., Navabian, M., and Lattore, B. (2013). Optimum design of alternate and conventional furrow fertigation to minimize nitrate loss. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139, 911–921. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000635](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000635)
- Ebrahimian, H., and Playán, E. (2014). Optimum management of furrow fertigation to maximize water and fertilizer application efficiency and uniformity. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 16, 591–607.

- El Chami, D., Daccache, A., and El Moujabber, M. (2020). What are the impacts of sugarcane production on ecosystem services and human well-being? A review. *Annals of Agricultural Sciences*, 65, 188-199. <https://doi.org/10.1016/j.aogas.2020.10.001>
- Elliott, R. L., and Walker, W. R. (1982). Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 25, 396-400. <https://doi.org/10.13031/2013.33542>
- El-Shafie, A. F., Marwa, M. A., and Dewedar, O. M. (2018). Hydraulic performance analysis of flexible gated pipe irrigation technique using GPIMOD model. *Asian Journal of Crop Science*, 10, 180-189. <https://doi.org/10.3923/ajcs.2018.180.189>
- El-Shafie, A. F., Osama, M. A., Hussein, M. M., El-Gindy, A. M., and Ragab, R. (2017). Predicting soil moisture distribution, dry matter, water productivity and potato yield under a modified gated pipe irrigation system: SALTMED model application using field experimental data. *Agricultural Water Management*, 184, 221-233. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.02.002>
- Elstein, D., Suszkiw, J., and Wood, M. (2004). The best of both worlds? Fertigation is an efficient way for many farmers to grow crops. *Agricultural Research*, 52, 18-20.
- Farthing, M. W., and Ogden, F. L. (2017). Numerical solution of Richards' equation: A review of advances and challenges. *Soil Science Society of America Journal*, 81, 1257. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.02.0058>
- Ferreira, I. E. P., Zocchi, S. S., and Baron, D. (2017). Reconciling the Mitscherlich's law of diminishing returns with Liebig's law of the minimum. Some results on crop modeling. *Mathematical Biosciences*, 293, 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.mbs.2017.08.008>
- Flores, J.E., Avila, E.C., López, D.J.P., Cabriaes, J.J.P., García, S.S. (2002) Eficiencia de la fertilización nitrogenada en sorgo con la técnica isotópica ^{15}N , en un Vertisol con drenaje subsuperficial. *Terra Latinoamericana*, 20, 129-139.
- Flores-Gallardo, H., Sifuentes-Ibarra, E., Flores-Magdaleno, H., Ojeda-Bustamante, W. (2014) Técnicas de conservación del agua en riego por gravedad a nivel parcelario* Water conservation techniques in surface irrigation at plantation level. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5, 241-252.

- Franco, E.T.H., Gavioli, L.B., Ferreira, A.G. (2006) In vitro regeneration of *Didymopanax morototoni*. Brazilian Journal of Biology, 66, 455-462. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842006000300011>
- Franco, H.C.J., Otto, R., Faroni, C.E., Vitti, A.C., Almeida de Oliveira, E.C., Trivelin, P.C.O. (2011) Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer under Brazilian field conditions. Field Crops Research, 121, 29-41. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.11.011>
- Garay-Jácome, A.S., Valdivia-Alcalá, R., Hernández-Ortiz, J., Sandoval-Romero, F. (2022) Estimación de la huella hídrica de la producción de caña de azúcar para los ingenios de la cuenca del Papaloapan. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 13, 103-113. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i1.2581>
- García, R. (2006) Sistemas complejos: conceptos, métodos y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria. Gedisa, Barcelona.
- García Saldaña, A. (2014) Eficiencia hidráulica de inyectores de fertilizantes diseñados para agroecosistemas con sistema de riego de baja presión (Tesis de maestría). Posgrado en Agroecosistemas Tropicales, Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Campus Veracruz, Veracruz, México.
- García-Saldaña, A. (2018) Distribución de fertirrigación por multicompuertas en un agroecosistema con caña de azúcar del Ejido Arroyo de Piedra, en Actopan, Veracruz. (Tesis de Doctorado). Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Veracruz, México.
- García-Saldaña, A., Landeros-Sánchez, C., Castañeda Chávez, M. del R., Martínez-Dávila, J.P., Pérez-Vázquez, A., Carrillo-Ávila, E. (2019). Fertirrigation with Low-Pressure Multi-Gate Irrigation Systems in Sugarcane Agroecosystems: A Review. Pedosphere, 29, 1-11. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(18\)60053-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60053-0)
- Gharajedaghi, J. (2005). 'Prólogo', in Herrscher, E.G. (ed.) Pensamiento sistémico: caminar el cambio o cambiar el camino, Buenos Aires: Granica.
- Gliessman, S.R. (2007) The Ecology of Sustainable Food Systems, New York: CRC Press, Taylor and Francis.
- Gliessman, S.R., Engles, E., Krieger, R. (1998) Agroecology: Ecological Processes in Sustainable Agriculture, CRC Press.

- Gómez, L.F., Ríos-Osorio, L., Eschenhagen, M.L. (2015). Las bases epistemológicas de la agroecología. *Agrociencia*, 49, 679-688.
- González Torres, A., Figueroa Viramontes, U., Preciado Rangel, P., Núñez Hernández, G., Ortega, L., Guadalupe, J., Antuna Grijalva, O. (2016). Uso eficiente y recuperación aparente de nitrógeno en maíz forrajero en suelos diferentes. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7, 301-309.
- Harmsen, K., Moraghan, J.T. (1988). A comparison of the isotope recovery and difference methods for determining nitrogen fertilizer efficiency. *Plant and Soil*, 105, 55-67. <https://doi.org/10.1007/BF02371143>
- Haro, M.E., Navarro, I., Thompson, R., Jimenez, B. (2014). Estimation of the water footprint of sugarcane in Mexico: is ethanol production an environmentally feasible fuel option? *Journal of Water and Climate Change*, 5, 70-80. <https://doi.org/10.2166/wcc.2013.056>
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., Mekonnen, M. (2011) *The Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard*, Nebraska-Lincoln, USA: Daugherty Water for Food Global Institute, Faculty Publications.
- Hussein, M.M., El-Gindy, A.M., Mehanna, H.M., El-Shafie, A.F. (2016). Hydraulic Characteristics for Predicting Water Distribution of Self – Compensating Gated Pipe Irrigation Technique. *International Journal of ChemTech Research*, 9, 127-139.
- INDEX MUNDI (2023). Urea - Precio Mensual - Precios de Materias Primas' [Online]. <https://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=urea&meses=180> (Consulta: 21 de enero de 2023).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2023). Calculadora de inflación [En línea]. Índice Nacional de Precios al Consumidor disponible en <https://www.inegi.org.mx/app/indicesdeprecios/calculadorainflacion.aspx> (accedido el 01.03.23).
- Janat, M. (2007). Efficiency of Nitrogen Fertilizer for Potato under Fertigation Utilizing a Nitrogen Tracer Technique. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 38, 2401–2422. <https://doi.org/10.1080/00103620701588775>
- Jorrat, M. del M., Araujo, P.Z., and Mele, F.D. (2018). Sugarcane water footprint in the province of Tucumán, Argentina. Comparison between different management

- practices. *Journal of Cleaner Production*, 188, 521–529.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.242>
- Kachurina, O.M., Zhang, H., Raun, W.R., and Krenzer, E.G. (2000). Simultaneous determination of soil aluminum, ammonium- and nitrate-nitrogen using 1 M potassium chloride extraction. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 31, 893–903. <https://doi.org/10.1080/00103620009370485>
- Kadyampakeni, D.M., Morgan, K.T., Nkedi-Kizza, P., Schumann, A.W., and Jawitz, J.W. (2018). Modeling Water and Nutrient Movement in Sandy Soils Using HYDRUS-2D. *Journal of Environmental Quality*, 0. <https://doi.org/10.2134/jeq2018.02.0056>
- Kafkafi, U., Tarchitzky, J., and Melgar, R.J. (2012). Fertirrigación: una herramienta para una eficiente fertilización y manejo del agua. Asociación internacional de la industria de fertilizantes ; Instituto internacional de la potasa, París (28 rue Marbeuf, 75008); Horgen (Suiza).
- Kang, L., Fan, B., Chen, S., and Chen, Q. (2018). Fertigation combined with catch crop maximize vegetable yield and minimize N and P surplus. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 112, 87–99. <https://doi.org/10.1007/s10705-018-9932-8>
- Karandish, F., and Šimůnek, J. (2017). Two-dimensional modeling of nitrogen and water dynamics for various N-managed water-saving irrigation strategies using HYDRUS. *Agricultural Water Management*, 193, 174–190. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.07.023>
- Kaushal, A., Patole, R., and Singh, K.G. (2015). Drip irrigation in sugarcane: a review. *Agricultural Reviews*, 33, 211–219.
- Landeros-Sánchez, C., Castañeda-Chávez, M. del R., Lango-Reynoso, F., Moreno-Seceña, J.C., Palomares, G.M. (2007) Contaminación del agua por nitrógeno causada por la agricultura en zonas cañeras de Veracruz, México. Presentado en el IX Simposio Internacional y IV Congreso Nacional de Agricultura Sostenible Veracruz, Boca del Río, Veracruz, México, p. 371.
- Li, J., Meng, Y., Li, B. (2006) Field evaluation of fertigation uniformity as affected by injector type and manufacturing variability of emitters. *Irrigation Science*, 25, 117–125. <https://doi.org/10.1007/s00271-006-0039-7>

- Li, P., Lu, J., Hou, W., Pan, Y., Wang, Y., Khan, M.R., Ren, T., Cong, R., Li, X. (2017) Reducing nitrogen losses through ammonia volatilization and surface runoff to improve apparent nitrogen recovery of double cropping of late rice using controlled release urea. *Environ Sci Pollut Res*, 24, 11722–11733. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8825-8>
- Liang, Y., Yu, S., Zhen, Z., Zhao, Y., Deng, J., Jiang, W. (2020) Climatic change impacts on Chinese sugarcane planting: Benefits and risks. *Physics and Chemistry of the Earth*, 116. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102856>
- Liu, Y., Song, W. (2020) Modelling crop yield, water consumption, and water use efficiency for sustainable agroecosystem management. *Journal of Cleaner Production*, 253, 119940. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119940>
- Lugo-Perea, L.J., Rodríguez-Rodríguez, L.H. (2018) El agroecosistema: ¿objeto de estudio de la agroecología o de la agronomía ecologizada? *Anotaciones para una tensión epistémica*. *Id*, 6, 89–112. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2018.14.63382>
- Luo, H., Li, F. (2018) Tomato yield, quality and water use efficiency under different drip fertigation strategies. *Scientia Horticulturae*, 235, 181–188. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.072>.
- Macdonald, B.C.T., Nachimuthu, G., Chang, Y.F., Nadelko, A.J., Tuomi, S., Watkins, M. (2020) Nitrogen composition in furrow irrigated run-off water. *Agricultural Water Management*, 242, 106399. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106399>
- Malash, N. M., Flowers, T. J., and Ragab, R. (2008). Effect of irrigation methods, management and salinity of irrigation water on tomato yield, soil moisture and salinity distribution. *Irrigation Science*, 26, 313–323. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0095-7>
- Mardones, J. M., and Ursúa, N. (1982). *Filosofía de las ciencias humanas y sociales* (Primera Edición.). Colección Logos. Fontamara S. A.
- Maroufpoor, E., Faryabi, A., Ghamarnia, H., and Moshrefi, G. Y. (2010). Evaluation of uniformity coefficients for sprinkler irrigation systems under different field conditions in Kurdistan Province (Northwest of Iran). *Soil and Water Research*, 5, 139–145. <https://doi.org/10.17221/42/2009-SWR>

- Martínez Wilches, O. J., Manrique Estupiñán, R., and Carrillo Villamizar, P. (1984). Tamaño de parcela y número de repeticiones óptimas para experimentación en caña de ladera y en fincas de agricultores. *Revista ICA*, 19, 209–216.
- Martínez-Davila, J. P. (2010). Planificación en los agroecosistemas. In *Memorias de La XXIII Reunión Científica, Tecnológica, Forestal y Agropecuaria de Veracruz y II Del Trópico Mexicano* (pp. 55–66). México.
- Martínez-Dávila, J.P., and Casanova-Pérez, L. (2018). Epistemic and Conceptual Orphanhood in the Sustainability of Agroecosystems, in: Oliveira, A.B. de (Ed.), *Sustainability of Agroecosystems*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74110>
- Mazarei, R., Mohammadi, A. S., Naseri, A. A., Ebrahimian, H., and Izadpanah, Z. (2020). Optimization of furrow irrigation performance of sugarcane fields based on inflow and geometric parameters using WinSRFR in Southwest of Iran. *Agricultural Water Management*, 228, 105899. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105899>
- Mohammadi, A., Besharat, S., and Abbasi, F. (2019). Effects of irrigation and fertilization management on reducing nitrogen losses and increasing corn yield under furrow irrigation. *Agricultural Water Management*, 213, 1116–1129. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.11.007>
- Mohammadi-Ahmadmahmoudi, E., Deihimfard, R., and Noori, O. (2020). Yield gap analysis simulated for sugar beet-growing areas in water-limited environments. *European Journal of Agronomy*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125988>
- Moll, R.H., Kamprath, E.J., Jackson, W.A. (1982). Analysis and Interpretation of Factors Which Contribute to Efficiency of Nitrogen Utilization. *Agronomy Journal*, 74, 562-564.
- Moravejalahkami, B., Mostafazadeh-Fard, B., Heidarpour, M., Abbasi, F. (2012). The effects of different inflow hydrograph shapes on furrow irrigation fertigation. *Biosystems Engineering*, 111, 186-194. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.11.011>
- Moreno-Seceña, J.C. (2010). Evaluación del manejo del nitrógeno en el agroecosistema caña de azúcar. (Tesis de Doctorado). Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Veracruz.

- Nair, S., Johnson, J., Wang, C. (2013). Efficiency of Irrigation Water Use: A Review from the Perspectives of Multiple Disciplines. *Agronomy Journal*, 105, 351-363. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0421>
- Ng Kee Kwong, K.F., Paul, J.P., Deville, J. (1999). Drip-fertigation- a means for reducing fertilizer nitrogen to sugarcane. *Ex. Agric.*, 35, 31-37. <https://doi.org/10.1017/S0014479799001040>
- Otto, R., Castro, S.A.Q., Mariano, E., Castro, S.G.Q., Franco, H.C.J., Trivelin, P.C.O. (2016). Nitrogen Use Efficiency for Sugarcane-Biofuel Production: What Is Next?. *Bioenerg. Res.*, 9, 1272-1289. <https://doi.org/10.1007/s12155-016-9763-x>
- Padrón, J. (2007). Tendencias epistemológicas de la investigación científica en el siglo XXI. *Cinta de Moebio*, 1-28.
- Pahlevani, A., Ebrahimian, H., Abbasi, F., Fujimaki, H. (2021). Distribution of soil water and nitrate in furrow irrigation under different plastic mulch placement conditions for a maize crop: Field and modelling study. *Int. Agrophys.*, 35, 131-144. <https://doi.org/10.31545/intagr/135338>
- Parra, M., Perales R., M., Inzunsa M., F., Solano S, C., Hernández X, E., Santos O, A. (1984). La regionalización socioeconómica, una perspectiva agronómica. *Revista de Geografía Agrícola*, 2, 24–34.
- Peterson, E.E., Cunningham, S.A., Thomas, M., Collings, S., Bonnett, G.D., Harch, B. (2017). An assessment framework for measuring agroecosystem health. *Ecological Indicators*, 79, 265–275. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.04.002>
- Platas-Rosado, D.E., Vilaboa-Arroniz, J., González-Reynoso, L., Severino-Lendechy, V.H., López-Romero, G., Vilaboa-Arroniz, I. (2017). Un análisis teórico para el estudio de los agroecosistemas. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 20, 395–399.
- Playán, E., Faci, J.M. (1997). Border fertigation: field experiments and a simple model. *Irrig. Sci.*, 17, 163–171. <https://doi.org/10.1007/s002710050035>
- Secretaría de Economía (2022 31 de octubre). AVISO por el que se da a conocer el precio de referencia del azúcar base estándar para el pago de la caña de azúcar de la zafra 2022/2023, que propone el Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. *Diario Oficial de la Federación*.

https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5670167&fecha=31/10/2022#gs.c.tab=0

- Ravikumar, V., Vijayakumar, G., Šimůnek, J., Chellamuthu, S., Santhi, R., Appavu, K. (2011). Evaluation of fertigation scheduling for sugarcane using a vadose zone flow and transport model. *Agricultural Water Management*, 98, 1431–1440. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.04.012>
- Rebollar, S.R., Álvarez, A.C., Puebla, B.J., Jiménez, D.C., Rebollar, A.R. (2017). Costos de producción y rentabilidad de caña de azúcar para fruta (*Saccharum officinarum* L.) en una región del Estado de México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 21, 808–817.
- Robinson, A.R., Chamberlain, A.R. (1960). Trapezoidal Flumes for Open-Channel Flow Measurement. *Transactions of the ASAE*, 3, 0120–0124. <https://doi.org/10.13031/2013.41138>
- Rojas-Piloni, G. (2007). Las abstracciones en el desarrollo científico o el desarrollo de las abstracciones científicas. *Elementos: Ciencia y cultura*, 14, 39–43.
- Ruiz-Rosado, O. (2006). Agroecología: una disciplina que tiende a la transdisciplina. *Interciencia*, 31, 140–145.
- Sabillón, G.N., Merkle, G.P. (2004). Fertigation guidelines for furrow irrigation. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2, 576. <https://doi.org/10.5424/sjar/2004024-114>
- SAGARPA (2018). Panorama de la investigación de la agroindustria de la caña de azúcar (Informe de proyecto). Sagarpa, Ciudad de México.
- Salgado García, S., Nuñez Escobar, R., Peña Cabriales, J.J., Etchevers Barra, J.D., Palma López, D.J. (2001). Eficiencia de recuperación del nitrógeno del fertilizante en soca de caña de azúcar sometida a diferentes manejos de fertilización. *Terra Latinoamericana*, 19, 155–162.
- Santos, L.N.S. dos, Matsura, E.E., Gonçalves, I.Z., Barbosa, E.A.A., Nazário, A.A., Tuta, N.F., Elaiuy, M.C.L., Feitosa, D.R.C., de Sousa, A.C.M. (2016). Water storage in the soil profile under subsurface drip irrigation: Evaluating two installation depths of emitters and two water qualities. *Agricultural Water Management*, Special Issue: Water Management Strategies in Irrigated Areas Overseen by: Dr. Brent Clothier, 170, 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.025>

- Sathiyaraj, M., Priya, S. (2017). Irrigation Regimes and Fertigation Levels on Sugarcane under Subsurface Drip Fertigation. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6, 3674–3684. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.611.430>
- Schepers, J.S., Varvel, G.E., Watts, D.G. (1995). Nitrogen and water management strategies to reduce nitrate leaching under irrigated maize. *Journal of Contaminant Hydrology*, 20, 227–239. [https://doi.org/10.1016/0169-7722\(95\)00070-4](https://doi.org/10.1016/0169-7722(95)00070-4)
- Schmidt, J.E., Peterson, C., Wang, D., Scow, K.M., Gaudin, A.C.M. (2018). Agroecosystem tradeoffs associated with conversion to subsurface drip irrigation in organic systems. *Agricultural Water Management*, 202, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.02.005>
- Secretaria del Trabajo y Previsión Social (2023). Entra en vigor incremento al salario mínimo del 22% [En línea]. disponible en <http://www.gob.mx/stps/prensa/entra-en-vigor-incremento-al-salario-minimo-del-22?idiom=es> (consulta: 1 de marzo de 2023).
- Seyedzadeh, A., Panahi, A., Maroufpoor, E., Singh, V.P., Maheshwari, B. (2019) Developing a novel method for estimating parameters of Kostiaikov-Lewis infiltration equation. *Irrig Sci.* <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00660-4>.
- Shahrokhnia, M.H., Sepaskhah, A.R. (2016) Effects of irrigation strategies, planting methods and nitrogen fertilization on yield, water and nitrogen efficiencies of safflower. *Agricultural Water Management* 172, 18-30. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.04.010>.
- Shekinah, D.E., Gupta, C., Sundara, B., Rakkiyappan, P. (2012) Effect of drip irrigation, planting methods and fertigation on yield, quality and water use efficiency of sugarcane (*saccharum species hybrid*). *Int. J. Agric. Stat. Sci.* 8, 691-696.
- Silva, E., Azevedo, J., Resende, M. (1982) Development and test of a gated pipe used for furrow irrigation. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 17, 441-445.
- Šimůnek, Jirka, Bristow, K.L., Helalia, S.A., Siyal, A.A. (2016) The effect of different fertigation strategies and furrow surface treatments on plant water and nitrogen use. *Irrigation Science* 34, 53-69. <https://doi.org/10.1007/s00271-015-0487-z>.

- Simunek, J., Bristow, K.L., Helalia, S.A., Siyal, A.A. (2016) The effect of different fertigation strategies and furrow surface treatments on plant water and nitrogen use. *Irrig. Sci.* 34, 53-69. <https://doi.org/10.1007/s00271-015-0487-z>.
- Šimůnek, Jiří, Genuchten, M.T. van, Šejna, M. (2016) Recent Developments and Applications of the HYDRUS Computer Software Packages. *Vadose Zone Journal* 15. <https://doi.org/10.2136/vzj2016.04.0033>.
- Smith, M. (1992) CROPWAT: A Computer Program for Irrigation Planning and Management. Food and Agriculture Org., Rome, Italy.
- Smith, R.J., Watts, P.J., Mulder, S.J. (1986) Analysis and design of gated irrigation pipelines. *Agricultural Water Management* 12, 99-115. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(86\)90009-0](https://doi.org/10.1016/0378-3774(86)90009-0).
- Servicio Meteorológico Nacional (n.d.) Normales Climatológica por Estado. <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=ver> (Consulta: 7 de febrero de 2023).
- Solomon, K.H. (1984). Yield related interpretations of irrigation uniformity and efficiency measures. *Irrig Sci*, 5, 1-10, <https://doi.org/10.1007/BF00264605>
- Suárez, K. (2022). Los fertilizantes en México multiplican su precio ante la ofensiva rusa en Ucrania. *El País*. <https://elpais.com/mexico/2022-03-31/los-fertilizantes-en-mexico-multiplican-su-precio-ante-la-ofensiva-rusa-en-ucrania.html>
- Subbaiah, R. (2013). A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. *Irrig Sci*, 31, 225-258, <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0309-x>
- Trebuil, G. (1988). Principles and steps of the method of diagnosis on agrarian systems: a case of study from Sathing Phra area, Southern Thailand. in *Farming Systems Research and Development in Thailand, Lustrated Methodological Considerations and Recent Advances*. Haad Yai: Prince of Songkla University, 29-46.
- Varela, R.C.L., Cohen, I.S., Herrera, G.G., Ávila, J.G.A., Trejo, R., Arriaga, O.E., Mendez, J.S., Hernández, A.F., Torres, J.R. (2010). Uso de un modelo de simulación hidráulico para la evaluación y generación de recetas de riego en sistemas de riego superficial en el norte de México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 9, 43-50.

- Wang, D., Li, G., Mo, Y., Cai, M., Bian, X. (2018). Evaluation of optimal nitrogen rate for corn production under mulched drip fertigation and economic benefits. *Field Crops Research*, 216, 225-233, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.10.002>
- Wang, H., Wu, L., Cheng, M., Fan, J., Zhang, F., Zou, Y., Chau, H.W., Gao, Z., Wang, X. (2018). Coupling effects of water and fertilizer on yield, water and fertilizer use efficiency of drip-fertigated cotton in northern Xinjiang, China. *Field Crops Research*, 219, 169-179, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.02.002>
- Wang, Y., Aryana, S.A., Allen, M.B. (2019). An extension of Darcy's law incorporating dynamic length scales. *Advances in Water Resources*, 129, 70-79, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.05.010>
- Wezel, A., Soldat, V. (2009). A quantitative and qualitative historical analysis of the scientific discipline of agroecology. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 7, 3-18, <https://doi.org/10.3763/ijas.2009.0400>
- Wong González, E. (2010). ¿Después de un análisis de variancia?qué? Ejemplos en ciencia de alimentos. *Agron. Mesoam.*, 21, 349. <https://doi.org/10.15517/am.v21i2.4899>.
- Xiao, R., Guo, D., Ali, A., Mi, S., Liu, T., Ren, C., Li, R. and Zhang, Z. (2019). Accumulation, ecological-health risks assessment, and source apportionment of heavy metals in paddy soils: A case study in Hanzhong, Shaanxi, China. *Environmental Pollution*, 248, 349-357. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.02.045>
- Xu, H., Dai, X., Chu, J., Wang, Y., Yin, L., Ma, X., Dong, S. and He, M. (2018). Integrated management strategy for improving the grain yield and nitrogen-use efficiency of winter wheat. *Journal of Integrative Agriculture*, 17, 315-327. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61805-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61805-7)
- Xu, W. and Mage, J.A. (2001). A review of concepts and criteria for assessing agroecosystem health including a preliminary case study of southern Ontario. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 83, 215-233. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00159-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00159-6)
- Yuguda, T.K., Li, Y., Zhang, W. and Ye, Q. (2020). Incorporating water loss from water storage and conveyance into blue water footprint of irrigated sugarcane: A case

- study of Savannah Sugar Irrigation District, Nigeria. *Science of The Total Environment*, 715, 136886. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136886>
- Zabala, J.A., Dolores de Miguel, M., Martínez-Paz, J.M. and Alcon, F. (2019). Perception welfare assessment of water reuse in competitive categories. *Water Science and Technology: Water Supply*, 19, 1525-1532. <https://doi.org/10.2166/ws.2019.019>
- Zemenchik, R.A. and Albrecht, K.A. (2002). Nitrogen use efficiency and apparent nitrogen recovery of Kentucky bluegrass, smooth brome grass, and orchardgrass. *Agronomy Journal*, 94, 421. <https://doi.org/10.2134/agronj2002.0421>
- Zerihun, D., Sanchez, C.A., Farrell-Poe, K.L., Adamsen, F.J. and Hunsaker, D.J. (2003). Performance Indices for Surface N Fertigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129, 173-183. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2003\)129:3\(173\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:3(173))
- Zerihun, D., Sanchez, C.A., Furman, A., Warrick, A.W. (2005). Coupled Surface–Subsurface Solute Transport Model for Irrigation Borders and Basins. II. Model Evaluation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(5), 407-419. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:5\(407\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:5(407))
- Zerihun, D., Sanchez, C.A., Lazarovitch, N., Warrick, A.W., Clemmens, A.J., Bautista, E. (2014). Modeling Flow and Solute Transport in Irrigation Furrows. *Irrigation and Drainage Systems Engineering*, 3, 1-16. <https://doi.org/10.4172/2168-9768.1000124>
- Zerihun, D., Wang, Z., Rimal, S., Feyen, J., Mohan Reddy, J. (1997). Analysis of Surface Irrigation Performance Terms and Indices. *Agricultural Water Management*, 34, 25-46. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(97\)00005-X](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(97)00005-X)
- Zhang, J., Dong, S., Dai, X., Wu, T., Wang, X., Bai, H., Wang, L., He, M. (2016). Combined Effect of Plant Density and Nitrogen Input on Grain Yield, Nitrogen Uptake and Utilization of Winter Wheat. *Vegetos- An International Journal of Plant Research*, 29, 63. <https://doi.org/10.5958/2229-4473.2016.00023.9>
- Zhu, S., Vivanco, J.M., Manter, D.K. (2016). Nitrogen Fertilizer Rate Affects Root Exudation, the Rhizosphere Microbiome and Nitrogen-use-efficiency of Maize. *Applied Soil Ecology*, 107, 324-333. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.07.009>

ANEXOS

Anexo 1. Prueba de normalidad para la variable rendimiento.

Histograma

Procedimiento UNIVARIATE

Variable: rend (rend)

Momentos

N	60	Sumar pesos	60
Media	69.1686206	Observ suma	4150.11724
Desviación std	12.2974656	Varianza	151.227661
Asimetría	0.14439477	Curtosis	-0.0130605
SC no corregida	295980.317	SC corregida	8922.43202
Coef. variación	17.7789662	Media error std	1.58759599

Medidas estadísticas básicas

Ubicación		Variabilidad	
Media	69.16862	Desviación std	12.29747
Mediana	67.65803	Varianza	151.22766
Moda	59.28690	Rango	59.92098
		Rango intercuartil	18.72683

Nota: El nodo mostrado es el menor de 4 modos con un número 2.

Tests para posición: $\mu_0=0$

Test	Estadístico	P valor
T de Student	t 43.56815	Pr > t <.0001
Signo	M 30	Pr >= M <.0001
Rango con signo	S 915	Pr >= S <.0001

Test para normalidad

Test	Estadístico	P valor
Shapiro-Wilk	W 0.98496	Pr < W 0.6679
Kolmogorov-Smirnov	D 0.092974	Pr > D >0.1500
Cramer-von Mises	W-Sq 0.066738	Pr > W-Sq >0.2500
Anderson-Darling	A-Sq 0.381185	Pr > A-Sq >0.2500

Anexo 2. Resultados de la prueba de homogeneidad de varianzas de Bartlett aplicado a los resultados de la producción de caña de azúcar por hectárea por efecto de los tratamientos.

Valor K de Bartlett	Grados de libertad	Probabilidad de p
2.6644	4	0.6155

Anexo 3. Análisis de varianza de una vía de los tratamientos evaluados.

Procedimiento ANOVA

Información del nivel de clase

Clase	Niveles	Valores
Bloque	3	1 2 3
Tratamiento	5	1 2 3 4 5
N.º observaciones leídas		75
Número de observaciones usadas		75

Procedimiento ANOVA

Variable dependiente: rend rend

Origen	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
Modelo	6	1882.40365	313.73394	2.53	0.0284
Error	68	8419.99750	123.82349		
Total corregido	74	10302.40116			

R-cuadrado Var Coef. Raíz MSE Media de rend

0.182715 16.36296 11.12760 68.00481

Origen	DF	Anova SS	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
Bloque	2	591.802314	295.901157	2.39	0.0993
Tratamiento	4	1290.601340	322.650335	2.61	0.0433

Anexo 4. Análisis de varianza de dos vías de las variables bloque, dosis, duración del fertirriego y su interacción.

Procedimiento ANOVA

Información del nivel de clase

Clase	Niveles	Valores
bloque	3	1 2 3
dosis	2	70 100
duracion	2	50 100
N.º observaciones leídas		60

Número de observaciones usadas 60

Procedimiento ANOVA

Variable dependiente: Rendimiento

Origen	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
Modelo	5	1161.953803	232.390761	1.62	0.1712
Error	54	7760.478219	143.712560		
Total corregido	59	8922.432022			

R-cuadrado Var Coef. Raíz MSE Media de rend

0.130228 17.33158 11.98802 69.16862

Origen	DF	Anova SS	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
Bloque	2	277.6888448	138.8444224	0.97	0.3870
Dosis de N	1	158.5102016	158.5102016	1.10	0.2983
Tiempo de fertirriego	1	611.4596797	611.4596797	4.25	0.0440
Dosis*Duración	1	114.2950765	114.2950765	0.80	0.3765

Anexo 5. Análisis de varianza de los indicadores de Uniformidad CUC

Procedimiento REG

Modelo: M1

Variable dependiente: CUC

N.º observaciones leídas 8

N.º observaciones usadas 8

Análisis de varianza

Origen	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
Modelo	1	84.60506	84.60506	4.14	0.0880
Error	6	122.53369	20.42228		
Total, corregido	7	207.13875			

Raíz MSE 4.51910 **R-cuadrado** 0.4084

Media dependiente 84.53750 **R-Sq Ajust** 0.3099

Coef Var 5.34568

Estimaciones de parámetro

Variable	DF	Estimación de parámetros	Error estándar	t valor	Pr > t
Intercept	1	45.22215	19.38192	2.33	0.0584
cucs	1	0.44996	0.22107	2.04	0.0880

Covarianza de estimadores

Variable	Intercept	cucs
Intercept	375.65878984	-4.270168866
cucs	-4.270168866	0.0488717467

Anexo 6. Análisis de varianza de los indicadores de uniformidad de la distribución (UD_¼).

Procedimiento REG

Modelo: M1

Variable dependiente: udo

N.º observaciones leídas 8

N.º observaciones usadas 8

Análisis de varianza

Origen	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
Modelo	1	0.42705	0.42705	0.02	0.8951
Error	6	135.51295	22.58549		
Total corregido	7	135.94000			
Raíz MSE		4.75242	R-cuadrado		0.0031
Media dependiente		88.15000	R-Sq Ajust		-0.1630
Coef Var		5.39129			

Covarianza de estimadores

Variable	Intercept	uds
Intercept	87.159370316	-1.111697924
uds	-1.111697924	0.0146541166

Anexo 7. Valor estimado de toneladas de caña de azúcar producidas por hectárea, medida en cinco puntos a lo largo de las parcelas experimentales.

Duración del fertirriego (minutos)	Dosis N en fertirriego (kgNha ⁻¹)	Rendimiento en los puntos de muestreo en las parcelas (t ha ⁻¹)					Promedio
		0	1	2	3	4	
-	Convencional	48.8	57.2	58.0	60.1	51.9	55.2
-	Convencional	71.1	67.2	52.8	71.7	77.3	68.0
-	Convencional	67.0	71.8	62.5	65.4	67.5	66.8
50	80.5	60.2	57.2	77.8	64.1	65.4	64.9
50	80.5	53.4	52.0	73.5	66.0	98.8	68.7
50	80.5	67.5	46.6	79.2	68.0	63.6	65.0
50	161	54.4	59.3	64.7	76.6	59.3	62.9
50	161	38.8	61.0	59.3	81.0	71.8	62.4
50	161	83.1	67.2	76.6	76.0	56.9	72.0
100	80.5	67.7	78.9	48.5	78.0	81.2	70.9
100	80.5	73.4	64.1	98.2	81.2	83.8	80.2
100	80.5	82.0	79.0	82.9	69.1	62.4	75.1
100	161	67.6	65.7	82.2	54.7	67.0	67.4
100	161	58.6	60.3	83.4	92.1	85.2	75.9
100	161	68.4	54.2	69.4	63.6	68.1	64.7

En la dosis convencional no hubo fertirriego, por lo tanto, el nitrógeno en fertirriego es cero, sin embargo, esta dosis contempla la totalidad de 261 kg de N aplicado en forma sólida al suelo.

Anexo 8. Prueba de normalidad de los datos de rendimiento.

Histograma

Procedimiento UNIVARIATE

Variable: rend (rend)

Momentos

N	75	Sumar pesos	75
Media	68.0048102	Observ suma	5100.36077
Desviación std	11.7992219	Varianza	139.221637
Asimetría	0.252026	Curtosis	0.10294909
SC no corregida	357151.467	SC corregida	10302.4012
Coef. variación	17.3505695	Media error std	1.36245679

Medidas estadísticas básicas

Ubicación		Variabilidad	
Media	68.00481	Desviación std	11.79922
Mediana	67.16418	Varianza	139.22164
Moda	59.28690	Rango	59.92098
		Rango intercuartil	17.97386

Nota: El nodo mostrado es el menor de 6 modos con un número 2.

Tests para posición: $\mu_0=0$

Test	Estadístico	P valor
T de Student	t 49.91337	Pr > t <.0001
Signo	M 37.5	Pr >= M <.0001
Rango con signo	S 1425	Pr >= S <.0001

Test para normalidad

Test	Estadístico	P valor
Shapiro-Wilk	W 0.98646	Pr < W 0.6084
Kolmogorov-Smirnov	D 0.086372	Pr > D >0.1500
Cramer-von Mises	W-Sq 0.061855	Pr > W-Sq >0.2500

Test para normalidad

Test	Estadístico	P valor
Anderson-Darling	A-Sq 0.36251	Pr > A-Sq >0.2500

Cuantiles (Definición 5)

Nivel	Cuantil
100% Máx	98.7709
99%	98.7709
95%	85.1624
90%	82.8578
75% Q3	77.2608
50% Mediana	67.1642
25% Q1	59.2869
10%	53.4460
5%	48.8184
1%	38.8499
0% Mín	38.8499

Anexo 9. Análisis de varianza de datos de rendimiento en función de dosis de nitrógeno en fertirriego y duración del fertirriego.

Procedimiento ANOVA

Información del nivel de clase

Clase	Niveles	Valores
bloque	3	1 2 3
dosis	2	80 161
duracion	2	50 100

N.º observaciones leídas 60

Número de observaciones usadas 60

Procedimiento ANOVA

Variable dependiente: rend rend

Origen	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
Modelo	5	1161.953803	232.390761	1.62	0.1712
Error	54	7760.478219	143.712560		
Total corregido	59	8922.432022			

R-cuadrado Var Coef. Raíz MSE Media de rend

0.130228 17.33158 11.98802 69.16862

Origen	DF	Anova SS	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
bloque	2	277.6888448	138.8444224	0.97	0.3870
Dosis	1	158.5102016	158.5102016	1.10	0.2983
Duracion	1	611.4596797	611.4596797	4.25	0.0440
Dosis*Duracion	1	114.2950765	114.2950765	0.80	0.3765

Anexo 10. Análisis de varianza de HHT en función de la dosis de nitrógeno fertilizante y duración del fertirriego.

Procedimiento ANOVA

Información del nivel de clase

Clase	Niveles	Valores
bloque	3	1 2 3
dosis	2	80 161
duracion	2	50 100
N.º observaciones leídas		60

Número de observaciones usadas 60

Procedimiento ANOVA

Variable dependiente: HHT

Origen	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
Modelo	5	21768.8040	4353.7608	1.21	0.3156
Error	54	193804.3026	3588.9686		
Total corregido	59	215573.1065			

R-cuadrado Var Coef. Raíz MSE Media de HHT

0.100981 18.98518 59.90800 315.5513

Origen	DF	Anova SS	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
bloque	2	2294.84246	1147.42123	0.32	0.7277
dosis	1	2942.54643	2942.54643	0.82	0.3692
duracion	1	14927.21864	14927.21864	4.16	0.0463
dosis*duracion	1	1604.19643	1604.19643	0.45	0.5066

Anexo 11. Resultados de las simulaciones con base en los valores de k y a estimados para cada tratamiento en cada evento de fertirriego

EF	Tratamiento	Criterio	sy	n	K	a	UD	CUC	Ea	nrmse	Dist
2	T50N161	MinNrms	0.1	0.38	0.0020	0.408	38.9	68.8	100.4	16.9	101
2	T50N161	MaxDist	0.99	0.38	0.0003	0.582	86.8	91.4	83	58.3	136
2	T50N80	MinNrms	0.9	0.52	0.0006	0.515	57	76.5	99.6	40.5	104
2	T50N80	MaxDist	1.5	0.52	0.0000	0.715	81.4	90.3	80.3	64.3	136
2	T100N161	MinNrms	0.5	0.08	0.0028	0.306	95	97.4	60.5	3	136
2	T100N161	MaxDist									
2	T100N80	MinNrms	0.77	0.6	0.0007	0.467	74.9	86.1	90.1	7.5	120
2	T100N80	MaxDist	0.99	0.52	0.0003	0.538	87.4	93.3	81.7	21.2	136
3	T50N161	MinNrms	0.2	0.4	0.0016	0.43	48.4	75.8	92.5	7.1	121
3	T50N161	MaxDist	0.7	0.2	0.0016	0.427	76.4	86.1	92.1	31.7	136
3	T50N80	MinNrms	0.3	0.24	0.0028	0.361	39.6	68.3	90.3	3.6	122
3	T50N80	MaxDist	0.7	0.48	0.0003	0.567	74.1	87.6	82.2	11.7	136
3	T100N161	MinNrms	0.3	0.28	0.0013	0.41	88.1	94	82.5	5.4	129
3	T100N161	MaxDist	0.2	0.24	0.0011	0.427	94.5	97.1	79.9	13.3	136
3	T100N80	MinNrms	0.2	0.33	0.0010	0.446	83.5	91.7	80	6.1	133
3	T100N80	MaxDist	0.3	0.33	0.0007	0.476	92.8	96.2	80.1	8.6	136

EF: Evento de fertirriego. Ea Eficiencia de aplicación; Dist: Distancia alcanzada por el flujo de agua en el surco. MinNrmse y MaxDist: Valores de Nrmse y Distancia como objetivos de las variables n y k estimadas.

Procedimiento ANOVA

Información del nivel de clase

Clase	Niveles	Valores
bloque	3	1 2 3
DN	2	80.5 161
TF	2	50 100

N.º observaciones leídas 60

Número de observaciones usadas 60

Procedimiento ANOVA

Variable dependiente: HHT

Origen	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
Modelo	5	7840.97513	1568.19503	1.21	0.3156
Error	54	69806.99165	1292.72207		
Total corregido	59	77647.96678			

R-cuadrado Var Coef. Raíz MSE Media de HHT

0.100981 18.98518 35.95444 189.3816

Origen	DF	Anova SS	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
bloque	2	826.586647	413.293323	0.32	0.7277
DN	1	1059.885212	1059.885212	0.82	0.3692
TF	1	5376.682629	5376.682629	4.16	0.0463
DN*TF	1	577.820643	577.820643	0.45	0.5066

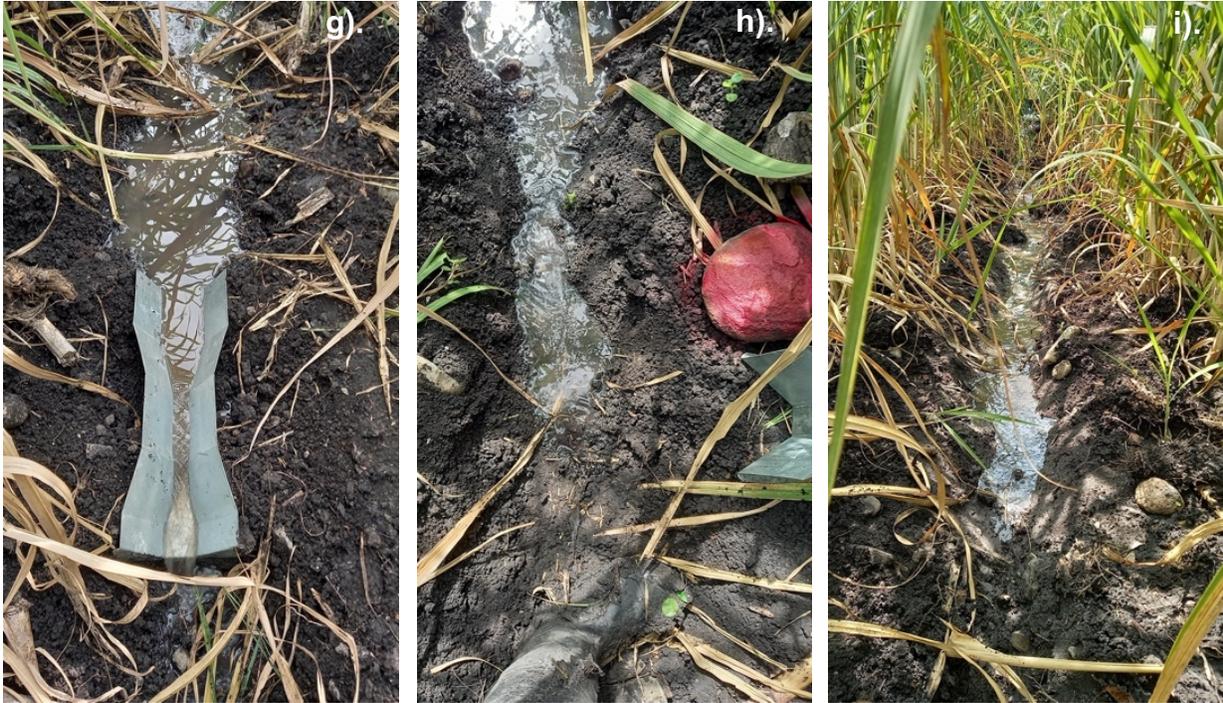
Anexo 12. Memoria fotográfica



Instalación del inyector Venturi en el sistema de riego de baja presión y multicompuerta, a) vista hacia el hidrante, b) vista hacia las multicompuertas; c) vista del tanque de solución fertilizante de urea.



Marcado de los puntos de muestreo a lo largo de los surcos (d y e) y toma de muestra de suelo (f).



Vistas del flujo del agua a lo largo del surco. g) Medidor de flujo tipo WSC, h) Llegada del flujo de agua a una de las marcas a lo largo del surco y i) vista amplia del avance del agua a lo largo del surco en el fertirriego.



Acomodado (j) y pesado (k) de tallos de caña de azúcar en uno de los puntos de muestreo.