



**EVALUACIÓN AGROHIDRÁULICA DE UN SISTEMA DE DRENAJE
SUBTERRÁNEO PARCELARIO CONTROLADO
CLAVE DE PROYECTO: RD-1904.1**

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
COORDINACIÓN DE RIEGO Y DRENAJE
SUBCOORDINACIÓN DE
CONTAMINACIÓN Y DRENAJE AGRÍCOLA

Noviembre de 2019



DIRECTORIO IMTA

Dr. Adrián Pedrozo Acuña

Director General

Dr. Carlos Fuentes Ruiz

Encargado de la Coordinador de Riego y Drenaje

Dr. José Antonio Quevedo Tiznado

Subcoordinador de Contaminación y Drenaje Agrícola

Personal técnico responsable

M.C. José Rodolfo Namuche Vargas, Jefe de proyecto

Dr. Carlos Fuentes Ruiz

Dr. José Antonio Quevedo Tiznado

M.C. Olga Xochitl Cisneros Estrada

Colaboradores del IMTA

Dra. María Dolores Olvera Salgado (Ingeniería de Riego)

M.I. Pablo Gallardo Almanza (Aguas Subterráneas)



ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO	1
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1 OBJETIVOS	3
2. ASPECTOS GENERALES	5
2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE INFLUENCIA	5
2.2 ÁREA DE ESTUDIO	9
2.3 FACTORES AGRONÓMICOS DEL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR	11
2.3.1 <i>Requerimientos climáticos</i>	12
2.3.2 <i>Requerimientos edafológicos</i>	14
2.3.3 <i>Consideraciones generales</i>	15
3. METODOLOGÍA	20
3.1. EVALUACIÓN AGRONÓMICA	22
3.1.1 <i>Diagnóstico edafoclimático</i>	23
3.2. EVALUACIÓN HIDRÁULICA	27
3.2.1 <i>Propiedades físico-químicas e hidrodinámicas del suelo</i>	27
3.2.2 <i>Instalación de los pozos de observación</i>	33
3.2.3 <i>Medición del gasto en colectores y la profundidad del nivel freático</i>	35
3.2.5 <i>Modelo de simulación de drenaje agrícola</i>	47
3.3 EVALUACIÓN ECONÓMICA Y FINANCIERA	51
3.3.1. <i>Criterios económicos, productivos y financieros</i>	53
4. RESULTADOS	57
4.1 EVALUACIÓN AGROHIDRÁULICA	57
4.1.1 <i>Evaluación hidráulica con base en el modelo de simulación de drenaje</i>	57
4.2 EVALUACIÓN ECONÓMICA Y FINANCIERA	58
5. CONCLUSIONES	62
BIBLIOGRAFÍA	63



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. A) UBICACIÓN DEL MUNICIPIO DE HUIXTLA, EN LA REGIÓN DEL SOCONUSCO B) COLINDANCIAS DEL MUNICIPIO DE HUIXTLA	5
ILUSTRACIÓN 2. ESTRUCTURA DE LA POBLACIÓN POR LOCALIDADES EN EL MUNICIPIO DE HUIXTLA CHIAPAS.	6
ILUSTRACIÓN 3. TEMPERATURAS PROMEDIO MENSUALES PARA EL MUNICIPIO DE HUIXTLA, CHIAPAS.	7
ILUSTRACIÓN 4. DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL EN HUIXTLA, CHIAPAS.	7
ILUSTRACIÓN 5. UBICACIÓN DE LOS INGENIOS AZUCAREROS DEL EDO. DE CHIAPAS.	10
ILUSTRACIÓN 6. VISTA AÉREA DEL INGENIO AZUCARERO DE HUIXTLA, CHIAPAS.	10
ILUSTRACIÓN 7. ÁREA DE ABASTECIMIENTO DE CAÑA DE AZÚCAR DEL INGENIO HUIXTLA, CHIAPAS.	11
ILUSTRACIÓN 8. ETAPAS FENOLÓGICAS DEL CULTIVO DE CAÑA DE AZUCAR (SAGARPA, 2015)	11
ILUSTRACIÓN 9. BALANCE HÍDRICO PARA LA ZONA CAÑERA	20
ILUSTRACIÓN 10. UBICACIÓN DEL MODULO DEMOSTRATIVO CON DRENAJE SUBTERRÁNEO CONTROLADO, DENTRO DEL RANCHO FOMENTO 001.	21
ILUSTRACIÓN 11. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA EN EL ÁREA CAÑERA DE INGENIO HUIXTLA.	24
ILUSTRACIÓN 12. COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN, AÑO 2019.	25
ILUSTRACIÓN 13. PRECIPITACIÓN ENTRE LA ESTACIÓN HUIXTLA Y LA ESTACIÓN FOMENTO, AÑO 2019.	25
ILUSTRACIÓN 14. ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE LA LLUVIA DE LA ESTACIÓN HUIXTLA, CHIAPAS.	26
ILUSTRACIÓN 15. PERFORACIÓN DEL POZO PARA TOMA DE MUESTRAS DE SUELO.	28
ILUSTRACIÓN 16. LOCALIZACIÓN DE LOS POZOS DE OBSERVACIÓN DE NIVEL FREÁTICO Y MUESTREO DE SUELOS.	28
ILUSTRACIÓN 17. TRABAJOS DE INSTALACIÓN DE LOS POZOS DE OBSERVACIÓN DE NIVELES FREÁTICOS: A) ESQUEMA DE UN POZO DE OBSERVACIÓN B) PLUVIOMETRO INSTALADO A 800 M DEL MÓDULO EXPERIMENTAL C) ADECUACIÓN DE LOS TUBOS DE PVC COMO POZOS DE OBSERVACIÓN D) RANURADO DE LOS TUBOS DE PVC.	33
ILUSTRACIÓN 18. TRABAJOS DE INSTALACIÓN DE LOS POZOS DE OBSERVACIÓN DE NIVELES FREÁTICOS: A) PERFORACIÓN DEL POZO DE OBSERVACIÓN HASTA 2 M DE PROFUNDIDAD B) INSTALACIÓN Y ADEMADO DEL POZO DE OBSERVACIÓN C) AGUA DRENADA POR EL SISTEMA DE DRENAJE SUBTERRÁNEO PARCELARIO CONTROLADO D) MEDICIÓN DEL GASTO EN UN DREN COLECTOR DEL SISTEMA DE DRENAJE SUBTERRÁNEO PARCELARIO CONTROLADO.	34
ILUSTRACIÓN 19. TRABAJOS DE INSTALACIÓN DE LOS POZOS DE OBSERVACIÓN DE NIVELES FREÁTICOS A) MEDICIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL POZO DE OBSERVACIÓN SOBRE EL DREN SUBTERRÁNEO B) MEDICIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREÁTICO EN EL CENTRO DE LA SEPARACIÓN DE DOS DRENES SUBTERRÁNEOS.	35
ILUSTRACIÓN 20. COMPORTAMIENTO DEL MANTO FREÁTICO Y GASTO EN EL EVENTO HORARIO.	36
ILUSTRACIÓN 21. COMPORTAMIENTO DEL MANTO FREÁTICO Y DESCARGA DE LOS DRENES, POZOS EN EL CENTRO DE LOS DRENES C Y D, A LADO IZQUIERDO DEL DREN D.	36
ILUSTRACIÓN 22. COMPORTAMIENTO DEL MANTO FREÁTICO PROMEDIO Y DESCARGA DE LOS DRENES. POZOS EN EL CENTRO DE LOS DRENES C Y D, A LADO IZQUIERDO DEL DREN D.	37
ILUSTRACIÓN 23. COMPORTAMIENTO DEL MANTO FREÁTICO Y DESCARGA DE LOS DRENES. POZOS SOBRE EL DREN D.	37
ILUSTRACIÓN 24. COMPORTAMIENTO DEL MANTO FREÁTICO PROMEDIO Y DESCARGA DE LOS DRENES, POZOS SOBRE EL DREN D.	38
ILUSTRACIÓN 25. COMPORTAMIENTO DEL MANTO FREÁTICO Y DESCARGA DE LOS DRENES. POZOS EN EL CENTRO DE LOS DRENES D Y E, A LADO DERECHO DEL DREN D.	38
ILUSTRACIÓN 26. COMPORTAMIENTO DEL MANTO FREÁTICO PROMEDIO Y DESCARGA DE LOS DRENES. POZOS EN EL CENTRO DE LOS DRENES D Y E, A LADO DERECHO DEL DREN D.	39
ILUSTRACIÓN 27. COMPORTAMIENTO DEL MANTO FREÁTICO Y GASTO EN EL EVENTO DIARIO.	39



ILUSTRACIÓN 28. COMPORTAMIENTO DEL MANTO FREÁTICO Y DESCARGA DE LOS DRENES. POZOS EN EL CENTRO DE LOS DRENES C Y D, A LADO IZQUIERDO DEL DREN D.	40
ILUSTRACIÓN 29. COMPORTAMIENTO DEL MANTO FREÁTICO PROMEDIO Y DESCARGA DE LOS DRENES, POZOS EN EL CENTRO DE LOS DRENES C Y D, A LADO IZQUIERDO DEL DREN D.	40
ILUSTRACIÓN 30. COMPORTAMIENTO DEL MANTO FREÁTICO Y DESCARGA DE LOS DRENES. POZOS SOBRE EL DREN D.	41
ILUSTRACIÓN 31. COMPORTAMIENTO DEL MANTO FREÁTICO PROMEDIO Y DESCARGA DE LOS DRENES, POZOS SOBRE EL DREN D.	41
ILUSTRACIÓN 32. COMPORTAMIENTO DEL MANTO FREÁTICO Y DESCARGA DE LOS DRENES. POZOS EN EL CENTRO DE LOS DRENES D Y E, A LADO DERECHO DEL DREN D.	42
ILUSTRACIÓN 33. COMPORTAMIENTO DEL MANTO FREÁTICO PROMEDIO Y DESCARGA DE LOS DRENES. POZOS EN EL CENTRO DE LOS DRENES D Y E, A LADO DERECHO DEL DREN D.	42
ILUSTRACIÓN 34. TRABAJOS PARA ACONDICIONAR EL DREN PARA EVACUAR 4M ³ DE AGUA A) DESAZOLVE DEL DREN 1 EN LA DESCARGA AL DREN INGENIO B) DESAZOLVE DEL DREN 1 HASTA 70 CM DE PROFUNDIDAD C) DESAZOLVE DEL DREN 1 D) DREN 1 EN CONDICIONES PARA OPERAR Y FUNCIONAMIENTO PARA EVACUAR 4 M ³ .	44
ILUSTRACIÓN 35. ACONDICIONAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS DE CONTROL DEL SISTEMA DE DRENAJE SUBTERRÁNEO: A) CORTE DE LOS BASTIDORES PARA SACAR LA COMPUERTA DE LA ESTRUCTURA A B) EXTRACCIÓN DE LA COMPUERTA CON EL TORNILLO SINFIN DE LA ESTRUCTURA B C) ESTRUCTURA A EN ÓPTIMAS CONDICIONES PARA OPERAR D) ESTRUCTURA B EN ÓPTIMAS CONDICIONES PARA OPERAR.	45
ILUSTRACIÓN 36. HABILITACIÓN DE LOS COLECTORES QUE DESFOGAN EL EXCESO DE AGUA DE LA PARCELA CON DRENAJE SUBTERRÁNEO: A) COLECTOR A DESTROZADO, SE TENDRÍA DIFICULTADES PARA MEDIR EL FLUJO B) COLECTOR D DESTROZADO, NO SE PODRÍA MEDIR EL FLUJO C) COLECTOR A REHABILITADO Y ÓPTIMAS CONDICIONES PARA SU BUEN FUNCIONAMIENTO D) COLECTOR D EN PROCESO DE SU REHABILITACIÓN.	46
ILUSTRACIÓN 37. ESQUEMA DE UN DRENAJE AGRÍCOLA SUBTERRÁNEO, EN EL QUE SE INDICA LA DISTANCIA ENTRE DRENES L ; ELEVACIÓN DE LA SUPERFICIE LIBRE H , ELEVACIÓN DEL ESTRATO IMPERMEABLE H_i , ELEVACIÓN DE LOS DRENES H_d , ELEVACIÓN DE LA SUPERFICIE H_s , ELEVACIÓN EN EL TIEMPO INICIAL H_o , ÉSTAS A PARTIR DE UN NIVEL DE REFERENCIA DENOMINADO "0". TAMBIÉN SE SEÑALA LA DISTANCIA ENTRE LA ELEVACIÓN DEL ESTRATO IMPERMEABLE Y LA ELEVACIÓN DEL DREN D_o , LA PROFUNDIDAD DE LOS DRENES A PARTIR DE LA SUPERFICIE P_d , ADEMÁS DE ALGUNAS DE LAS ELEVACIONES YA MENCIONADAS ESTABLECIDAS A PARTIR DE LA ELEVACIÓN DEL DREN H_d (h_o, h, h_s).	48
ILUSTRACIÓN 38. ESQUEMA REPRESENTATIVO DEL SISTEMA DE DRENAJE DE LA PARCELA EXPERIMENTAL DE DRENAJE	57
ILUSTRACIÓN 39. COMPARACIÓN DEL HIDROGRAMA DE SALIDA EXPERIMENTAL Y EL HIDROGRAMA DE SALIDA OBTENIDO CON EL MODELO MATEMÁTICO DESARROLLADO.	58



TABLA 1. SUBTIPOS CLIMÁTICOS EN EL MUNICIPIO DE HUIXTLA.....	6
TABLA 2. PRINCIPALES CULTIVOS POR CICLO AGRÍCOLA CON DATOS ESTADÍSTICOS DEL AÑO 2010.....	8
TABLA 3. PRINCIPALES CULTIVOS POR CICLO AGRÍCOLA, CON DATOS ESTADÍSTICOS DEL AÑO 2017.....	9
TABLA 4. DATOS DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS OPERADAS POR EL INGENIO HUIXTLA, AÑO 2019.....	24
TABLA 5. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS DE MUESTRAS DE SUELO TOMADAS EN EL MÓDULO DEMOSTRATIVO DE DRENAJE SUBTERRÁNEO CONTROLADO.....	29
TABLA 6. DIAGNÓSTICO DE LA SALINIDAD O ACIDEZ DEL SUELO	29
TABLA 7. DIRECTRICES PARA EVALUAR SUELOS SALINOS SÓDICOS O CALCÁREOS.	30
TABLA 8. CLASIFICACIÓN DEL PH, EVALUACIÓN Y SUS EFECTOS ESPERADOS.	32
TABLA 9. DESGLOSE DE COSTOS DE PRODUCCIÓN DEL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR.....	59
TABLA 10. EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA DE DRENAJE SUBTERRÁNEO PARCELARIO CONTROLADO	60
TABLA 11. TASA DE AMORTIZACIÓN (VPN) DEL SISTEMA DE DRENAJE PARCELARIO CONTROLADO.....	60
TABLA 12. TASA DE AMORTIZACIÓN (VPN) EN PESOS CONSTANTES.	61



RESUMEN EJECUTIVO

En el sureste de México anualmente se presentan inundaciones de terrenos agrícolas como consecuencia de las intensas precipitaciones y del desbordamiento de ríos. En el caso de Huixtla, Chiapas, que es una zona de alta marginación social y económica esto impacta a cientos de hectáreas sembradas de caña de azúcar y palma de aceite, que afectan a productores de las comunidades rurales de la zona.

La recuperación e incorporación de suelos inundados, salinos, sódicos o con otro problema o aptitud que limite a la producción agrícola, es resultado directo de la intervención técnica humana, a través del desarrollo e implementación de tecnología adecuada, que permita el buen manejo del suelo y el agua con sistemas de drenaje superficial y subterráneo controlado y riego complementario, a fin de mejorar las condiciones productivas.

En este contexto, es que el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, a través de la Coordinación de Riego y Drenaje, durante 2019, ejecutó el proyecto RD 1904.1, con el objetivo de realizar la “Evaluación agro-hidráulica de un sistema de drenaje subterráneo parcelario controlado”, de una parcela localizada en el Ingenio Huixtla, perteneciente al Distrito de Temporal Tecnificado 018, Huixtla, Chiapas, México.

La actividad agrícola del Municipio de Huixtla se concentra en el Distrito de Temporal Tecnificado 018 Huixtla Chiapas, el cual posee una superficie de 107,600 ha, y beneficia a 6,010 usuarios, y predomina la siembra de cultivos perennes y forrajes. En este DTT la superficie sembrada entre 2010 y 2017 osciló entre 76,554 y 64,928 ha, con rendimientos medios de 14.1 a 27.0 ton/ha. Generando una producción entre 1'076,584.4 y 1'777,117.31 toneladas de productos agrícolas.

Para la región en la cual se ubica el modulo demostrativo se reúnen los requisitos climáticos y edáficos básicos para el buen desarrollo de la caña de azúcar, sin embargo la única limitante edáfica encontrada, es aquella derivada del drenaje interno del suelo que es deficiente, lo cual afecta el contenido de sacarosa de la caña, por lo que se recomienda la instalación de la tecnología de los sistemas de drenaje controlado, para evacuar el exceso de agua del perfil del suelo, principalmente en las fases finales del ciclo vegetativo, con lo cual se propiciará un incremento en la producción de sacarosa, lo que representará finalmente un mejor ingreso para los productores de la zona.

Como resultado del proyecto se observó que la transferencia de agua en las zonas parcialmente saturada y no saturada del suelo puede abordarse con el uso de modelos de base física para predecir su comportamiento temporal y espacial. En materia de drenaje agrícola, éste fenómeno implica dos escalas de estudio: La macroscópica y la megascópica. Por lo tanto para la evaluación hidráulica, del sistema de drenaje, se consideró la escala megascópica, donde se considera que la velocidad media se





obtiene a partir de la aplicación promediada de la ley de Darcy. Se utilizó la ecuación de Boussinesq bajo las condiciones de radiación de Newton en la frontera, conocida también como “condición de Robbins”, que establece que el flujo de materia por la frontera es proporcional a la diferencia de carga en la vecindad inmediata de esta frontera.

Como resultado de la evaluación económica, para la zafra 2018/2019, considerando una separación entre drenes de 20 metros y un rendimiento promedio en el área de 90 ton/ha en caña, se obtuvo un rendimiento promedio en el módulo de drenaje subterráneo parcelario controlado de 110 ton/ha en caña con un precio de \$741.00/ha. Si se tiene en cuenta que el costo del sistema de drenaje subterráneo parcelario controlado es de \$42,000.00, lo que incluye la tubería, accesorios, estructura de control e instalación del Sistema, y un interés o tasa de descuento del 12%, se concluye que la tecnología del drenaje subterráneo parcelario probada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, en Huixtla , Chiapas, es altamente redituable, debido a que la inversión se recupera en el segundo año agrícola, donde la Relación Beneficio Costo obtenida fue de 2.1 y la Tasa Interna de retorno del 97 %.





1. INTRODUCCIÓN

Ante una creciente población, la fuerte demanda de recursos naturales y en especial del recurso hídrico, llevan a la necesidad de crear tecnologías que sean de utilidad para los meses donde el recurso hídrico sea deficiente; con este fin el Estado lleva a cabo programas de desarrollo tecnológico.

México, es un país con una gran riqueza en recursos hídricos; en especial en el sureste, donde el recurso agua es abundante. Sin embargo se requiere implementar tecnologías que permitan el buen manejo del suelo y el agua con sistemas de drenaje superficial y subterráneo controlado y riego complementario, a fin de mejorar las condiciones productivas.

En el Sureste de México, anualmente se presentan inundaciones de terrenos agrícolas como consecuencia de las intensas precipitaciones y del desbordamiento de ríos. En el caso de Huixtla, Chiapas, que es una zona de alta marginación social y económica, esto impacta a cientos de hectáreas sembradas de caña de azúcar y palma de aceite, que afectan a productores de las comunidades rurales de la zona.

Las prácticas agronómicas tradicionales sobre terrenos que sufren recurrentemente inundaciones tienen como su principal desventaja el largo tiempo de espera para que el agua se evapore o infiltre, para poder nuevamente aprovechar los terrenos, lo que no permite generar ingresos por cosechas a los productores, durante ese período, y los coloca en vulnerabilidad productiva y desventaja económica.

La producción y productividad agrícola son indicadores que proporcionan elementos de valoración económica, social, ambiental y de toma de decisiones en la producción agrícola. La recuperación e incorporación de suelos inundados, salinos, sódicos o con otro problema o aptitud que limite a la producción agrícola, es resultado directo de la intervención técnica humana, a través del desarrollo e implementación de tecnología adecuada.

1.1 Objetivos

General:

Realizar la evaluación agrohídrica, económica y financiera de un sistema de drenaje subterráneo parcelario controlado, de una parcela localizada en el Ingenio Huixtla, perteneciente al Distrito de Temporal Tecnificado 018, Huixtla, Chiapas.





Específicos:

- Registrar y analizar los de datos en un evento de drenaje
- Elaborar un modelo de simulación de drenaje agrícola
- Seleccionar muestras en transectos localizados tanto en una parcela sin drenaje o testigo como en la parcela con drenaje, para evaluar el impacto del sistema de drenaje conforme a la evolución del ciclo de cultivo.
- Determinar del intervalo de tiempo en que es posible adelantar la fecha de siembra del cultivo, así como el abatimiento medio que se prevé obtener como producto del funcionamiento del sistema de drenaje.
- Determinar parámetros econométricos: Relación Beneficio Costo (RBC), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Valor Actual Neto (VAN).
- Realizar un análisis comparativo de resultados tomando como testigos dos parcelas circundantes al predio donde se instale el sistema de drenaje parcelario subterráneo.
- Divulgar los resultados y las prácticas de demostración en el módulo experimental, mediante eventos específicos para dar a conocer los trabajos.
- Elaborar el documento técnico final de resultados y conclusiones.



2. ASPECTOS GENERALES

2.1 Caracterización de la zona de influencia

El Municipio de Huixtla se ubica al sur del estado de Chiapas, en la región del Soconusco, en la zona de transición entre el valle fluvial del río del mismo nombre con la planicie costera de Chiapas. Es decir, se encuentra entre la Sierra Madre de Chiapas y la llanura Costera del Pacífico (**Ilustración 1a y 1b**), específicamente en la porción apical del abanico aluvial que por sus características geológicas y geográficas representa una zona altamente vulnerable a inundaciones. Su altura sobre el nivel del mar es de 40 m. Sus coordenadas geográficas extremas son 15° 08' S, 14° 59' N, 92° 25' E y 92° 43' W (INEGI, Carta Topográfica 1:50 000).

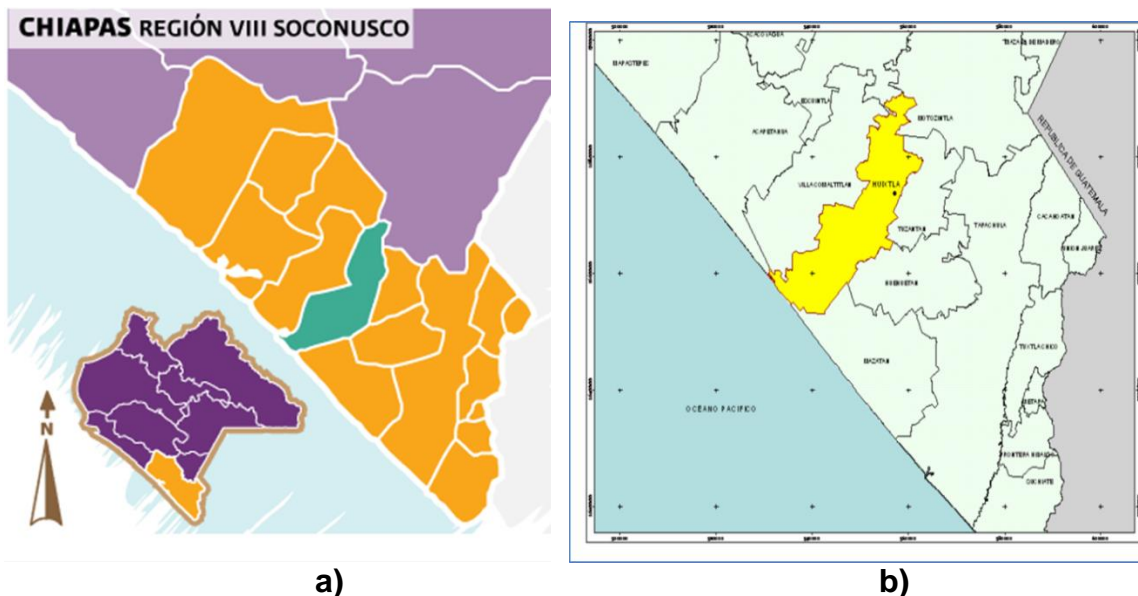


Ilustración 1. a) Ubicación del Municipio de Huixtla, en la Región del Soconusco b) Colindancias del Municipio de Huixtla

Huixtla colinda al Norte con los municipios de Villa Comaltitlán, Escuintla y Motozintla; al Este con los municipios de Motozintla, Tuzantán, Huehután, Mazatán y el Océano Pacífico; al Oeste con el Océano Pacífico y con los municipios de Acapetahua y Villa Comaltitlán. Posee una superficie de 397,551 km². Según datos de la Secretaría de Desarrollo Social, del año 2010, poseen una población de 51,359 habitantes. Cuenta con 178 localidades, de las cuales 138 poseen menos de 100 habitantes; 28 localidades que tienen de 100 a 499 habitantes; 10 localidades que tienen de 500 a 1,499 habitantes, una localidad que tiene de 1,500 a 2,499 habitantes y una sola localidad que posee más de 10,000 habitantes (**Ilustración 2**).

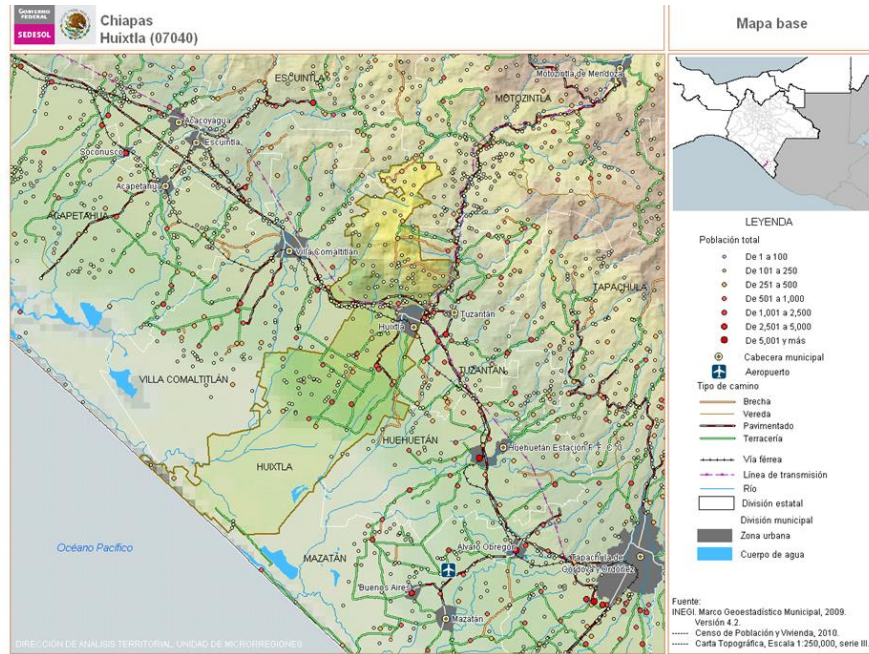


Ilustración 2. Estructura de la población por localidades en el Municipio de Huixtla Chiapas.

En Huixtla el clima es cálido-húmedo con abundantes lluvias en verano y posee 3 subtipos (**Tabla 1**). La temperatura promedio anual es de 28.4°C. Los registros de temperatura mensual de la Estación Meteorológica de Huixtla, se puede observar en la **Ilustración 3**. La precipitación pluvial es de 3402.6 mm anuales, y se distribuye según la gráfica de la **Ilustración 4**. El municipio de Huixtla, pertenece a la Región hidrológico-Administrativa XI Frontera Sur y a la Subregión hidrológica No. 23 Costa de Chiapas. En este municipio el Río principal es el Huixtla, seguido del río Fortuna, también existen 2 arroyos el Cusco y Cuba. Los suelos predominantes en el municipio son: Cambisoles, Acrisoles y Solonchak (SGM, 2006).

Tabla 1. Subtipos climáticos en el Municipio de Huixtla.

Subtipo	Símbolo	% de la superficie Municipal
Cálido-Húmedo con abundantes lluvias en verano	Am	43.15
Cálido-Subhúmedo con lluvias en verano y de mayor humedad	Aw2	54.51
Semicálido-Húmedo con abundantes lluvias en verano	ACm	2.34

Fuente: INEGI.2015. Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta de Climas Escala 1:1 000 000, serie I.

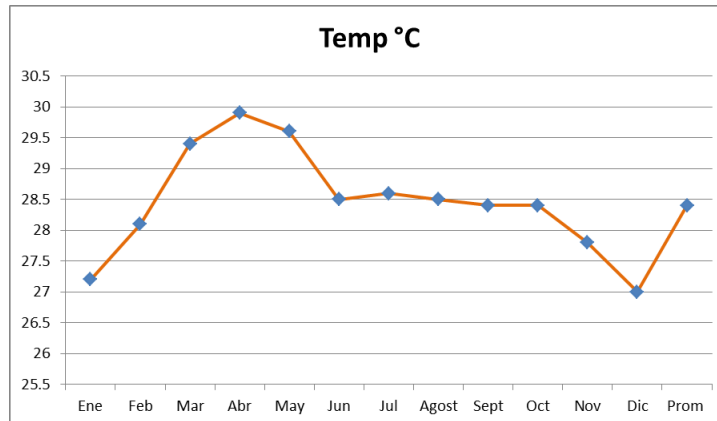


Ilustración 3. Temperaturas promedio mensuales para el Municipio de Huixtla, Chiapas.

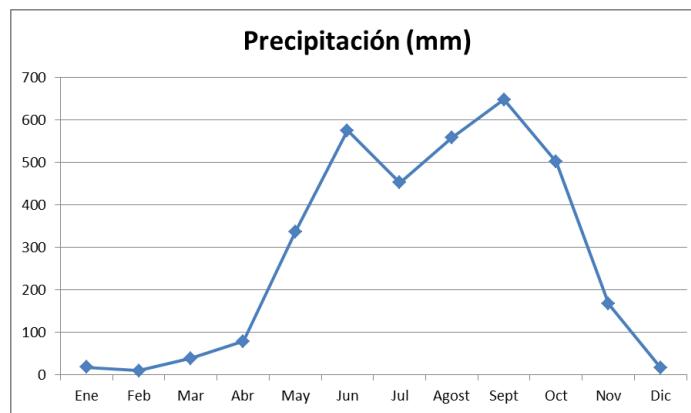


Ilustración 4. Distribución mensual de la precipitación pluvial en Huixtla, Chiapas.

Predominan los usos agrícola, pecuario y selva mediana. Según el Inventario Forestal de Chiapas del año 2000, el municipio de Huixtla presentó una superficie de pastizal cultivado de 137 km², 131 km² de superficie agrícola, 66 km² de popal y 13 km² de manglar.

La actividad agrícola del Municipio de Huixtla se concentra en el Distrito de Temporal Tecnificado 018 Huixtla Chiapas, el cual posee una superficie de 107,600 ha, y beneficia a 6,010 usuarios. En la actividad agrícola predomina la siembra de cultivos perennes y forrajes. De los perennes sobre sale la siembra de caña de azúcar en alrededor de 9,216.5 ha, y de los cultivos forrajeros, se cultivan pastos en una superficie de 36,077 ha.

Del ciclo Primavera-Verano se siembran principalmente, maíz con una superficie de aproximadamente 3,315.5 ha y Soya en una superficie de 2,639 ha. Del ciclo Otoño-Invierno, se siembra principalmente ajonjolí en una superficie de 3,376.5 ha. En este





DTT 018 la superficie sembrada entre 2010 y 2017 ha oscilado entre 76,554 y 64,928 ha, con rendimientos medios de 14.1 a 27.0 ton/ha. Generando una producción entre 1'076,584.4 y 1'777,117.31 toneladas de productos agrícolas (**Tabla 2 y Tabla 3**).

Tabla 2. Principales cultivos por ciclo agrícola con datos estadísticos del año 2010.

Ciclo	Cultivo	Sup. sembrada (ha).	Sup. Cosech (ha).	Rend. (ton/ha)	Producción (Ton)	P.M.R. (\$/Ton)	Valor de la producción (Miles \$)
TOTAL GENERAL		76,544.00	76,544.00	14.1	1'076584.4	1695.1	1'824,932.1
Otoño-Invierno		4,245.50	4,245.50	1.4	5,742.70	7,498.20	43,059.70
	Ajonjolí	3,376.50	3,376.50	0.8	2,701.20	12,000.00	32,414.40
	Maíz	869	869	3.5	3041.5	3,500.00	10,645.30
Primavera-Verano		6,097.00	6,097.00	3	18,254.00	3,901.60	71,220.30
	Maíz	3,315.50	3,315.50	3	9,946.50	3,500.00	34,812.80
	Sandía	142.5	142.5	12	1,710.00	2,000.00	3,420.00
	Soya	2,639.00	2,639.00	2.5	6,597.50	5,000.00	32,987.50
Perennes		66,201.50	66,201.50	15.9	1'052,587.7	1,652.20	1'710,652.2
	Banano	566	566	50	28,300.00	2,000.00	56,600.00
	Cacao	6,609.50	6,609.50	0.4	2,643.80	40,000.00	105,752.00
	Caña de Azúcar	9,216.50	9,216.50	85	783,402.50	450	352,531.10
	Coco	645	645	20	12,900.00	1,500.00	19,350.00
	Mango	5,741.00	5,741.00	7	40,187.00	5,000.00	200,935.00
	Marañón	173	173	1.2	207.6	6,000.00	1,245.60
	Palma de aceite	2,651.00	2,651.00	16.5	43,741.50	1,300.00	56,864.00
	Papaya	277	277	60	16,620.00	2,000.00	33,240.00
	Pastos	36,077.50	36,077.50	1.1	39,685.30	18,000.00	714,334.50
	Plátano	4,245.00	4,245.00	20	84,900.00	2,000.00	169,800.00

Fuente: CONAGUA. 2011. Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Temporal Tecnificado. Año Agrícola 2010.





Tabla 3. Principales cultivos por ciclo agrícola, con datos estadísticos del año 2017.

Ciclo	Cultivo	Sup. sembrada (ha).	Sup. Cosech (ha).	Rend. (ton/ha)	Producción (Ton)	P.M.R. (\$/Ton)	Valor de la producción (Miles \$)
TOTAL GENERAL		64,928.40	64,928.40	27.37	1'777,117.31	959.35	1'704,877.37
Otoño-Invierno		3,868.40	3,868.40	1.04	4,023.28	9,120.48	36,694.23
	Ajonjolí	3,059.00	3,059.00	0.63	1,918.25	15,422.87	29,584.92
	Maíz	540.00	540.00	2.25	1,217.66	3,263.54	3,973.88
	Melón	9.40	9.40	18.92	177.86	1,900.00	337.93
	Sorgo	215.00	215.00	2.89	620.86	3,318.40	2,060.26
	Soya	45	45	1.97	88.65	8,316.18	737.23
Primavera-Verano		6,365.00	6,365.00	2	12,718.60	5,455.79	69,390.00
	Maíz	3,200.00	3,200.00	1.98	6,336.00	3,900.00	24,710.40
	Soya	3,165.00	3,165.00	2.02	6,382.60	7,000.22	44,679.60
Perennes		54,695.00	54,695.00	32.19	1'760,375.43	908.21	1'598,793.14
	Cacao	4,408.00	4,408.00	0.3	1,318.61	31,041.59	40,931.75
	Caña de Azúcar	11,937.00	11,937.00	85.8	1'024,162.79	586.4	600,569.06
	Mango	7,509.00	7,509.00	5.42	40,680.92	5,084.00	206,821.80
	Marañón	529.00	529.00	1.24	655.32	5,418.00	3,550.52
	Palma de aceite	5,803.00	5,803.00	18.98	110,165.49	1,550.00	170,756.51
	Papaya	80.00	80.00	106.52	8,521.36	4,337.00	36,957.14
	Pastos	20,285.00	20,285.00	21.99	446,117.52	502.65	224,240.97
	Plátano	4,112.00	4,112.00	31.25	128,483.50	2,428.00	311,957.94
	Rambután	32.00	32.00	8.44	269.92	11,142.00	3,007.45

Fuente: CONAGUA.2019. Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Temporal Tecnificado. Año Agrícola 2017.

2.2 Área de estudio

El estado de Chiapas cuenta con 2 ingenios azucareros, el Ingenio Pujiltic ubicado en el municipio de Venustiano Carranza y el Ingenio Huixtla, ubicado en el municipio del mismo nombre (**Ilustración 5**) El trabajo experimental se realizó en una parcela sembrada con caña de azúcar del área de influencia del Ingenio Huxitla.

El Ingenio Huixtla fundado en 1975, se ubica en las coordenadas geográficas 15° 05´ de Latitud Norte y 92° 30´ de Longitud Oeste, a una altitud de 35 msnm. (**Ilustración 6**).





El Ingenio Huixtla, procesa 1'290,421 ton de caña de azúcar, las cuales producen 131,081 ton de azúcar. Lo que indica que se requiere 9.84 ton de caña para producir 1 tonelada de azúcar. El área de abastecimiento del Ingenio Huixtla abarca una superficie de 13,031 ha, distribuidas en los municipios de: Huixtla, Villa Comaltitlán, Huehuetán, Mazatán, Acapetahua, Tapachula, Tuzantán y Escuintla (**Ilustración 7**).

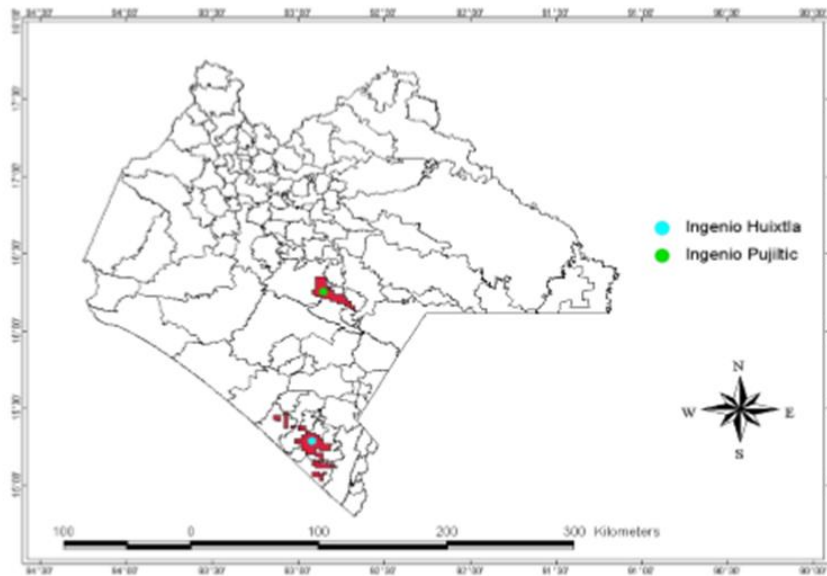


Ilustración 5. Ubicación de los ingenios azucareros del Edo. de Chiapas.



Ilustración 6. Vista aérea del Ingenio Azucarero de Huixtla, Chiapas.



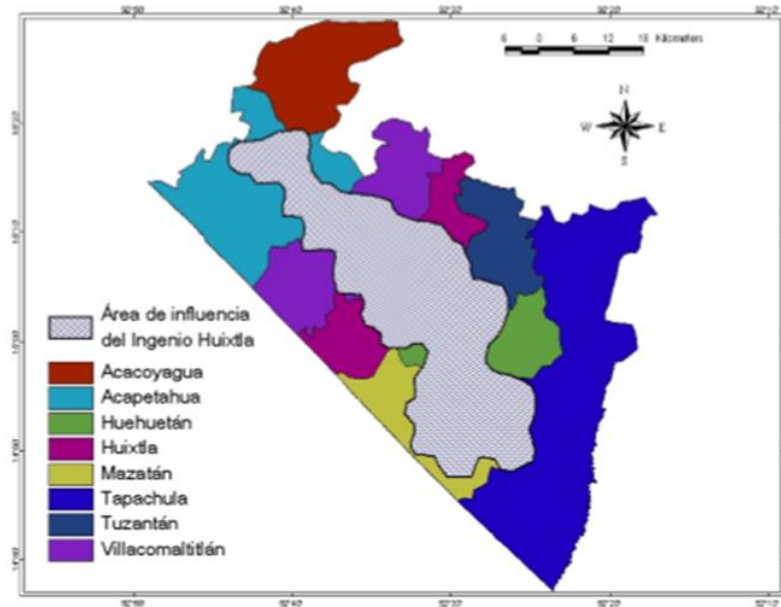


Ilustración 7. Área de abastecimiento de caña de azúcar del Ingenio Huixtla, Chiapas.

2.3 Factores agronómicos del cultivo de caña de azúcar

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) es una gramínea originaria de Nueva Guinea (Fauconier y Bassereau, 1980). Este cultivo de caña de azúcar en su ciclo de plantilla, tiene un desarrollo vegetativo de duración variable, que depende de la variedad y de la influencia del clima. De la siembra a la cosecha, existe un período de 14 a 17 meses, período en el cual el cultivo pasa por cuatro etapas y enseguida se da la cosecha (**Ilustración 8**):

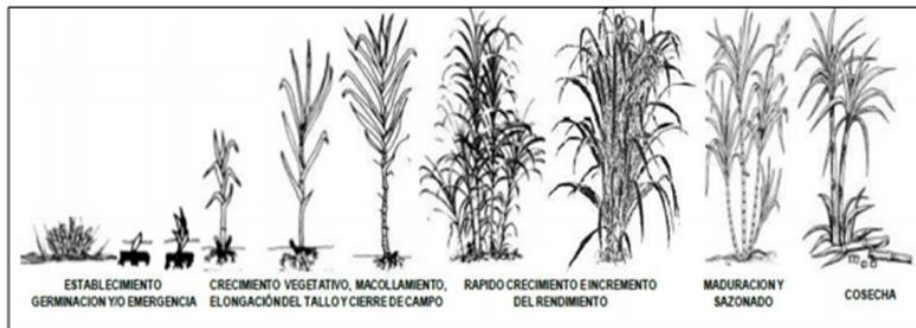


Ilustración 8. Etapas Fenológicas del cultivo de caña de azúcar (SAGARPA, 2015)



Germinación y emergencia. Esta etapa inicia entre los 7 a 10 días después de la siembra y se prolonga hasta los 35 días. Las temperaturas óptimas para el brote oscilan de los 24 a 37° C.

Amacollamiento o ahijamiento. Comienza alrededor de los 35 a 40 días después de la siembra y se caracteriza por el brote de varios tallos a partir de las articulaciones nodales que se encuentran en la base de los tallos primarios. Las temperaturas óptimas para el ahijamiento son de 30°C. Los factores que favorecen el ahijamiento son los días largos y de alta duración luminosa, buenas condiciones de humedad en el suelo y buen nivel de nitrógeno (FIRA, 2010).

Crecimiento. Comienza hacia los 120 días después de la siembra y es alrededor de los 180 días que queda definido el número de tallos. Es en esta etapa que comienza el almacenamiento de azúcar en los entrenudos de los tallos. Para lograr un adecuado crecimiento la caña requiere de una temperatura de 30°C, disponibilidad de nutrientes y buena condición de humedad.

Maduración. Comienza alrededor de los 180 días posteriores a la siembra y dura entre 60 y 90 días. Es en este período que se da la síntesis y acumulación de sacarosa en los tallos de la caña, favorecidos por temperaturas de 18° C en las noches y días calurosos y secos.

Cosecha. Esta actividad se lleva a cabo entre los 14 a 17 meses posteriores a la siembra, dependiendo de la variedad establecida. Cuando los tallos dejan de crecer, las hojas se marchitan y caen y la corteza de la capa se vuelve quebradiza. La caña se corta cerca del suelo y también por el extremo superior cerca del último nudo. Ya cortadas se apilan a lo largo del campo de donde se recogen para su transporte hacia el Ingenio azucarero.

2.3.1 Requerimientos climáticos

Los principales componentes climáticos que controlan el crecimiento, el rendimiento y la calidad de la caña son la temperatura, la luz y la humedad disponible. La planta crece bien en regiones tropicales asoleadas. Las características climáticas ideales para lograr una máxima producción de azúcar de caña son:





Precipitación. Una precipitación total entre 1,100 y 1,500 mm es adecuada, siempre que la distribución de luz sea apropiada y abundante en los meses de crecimiento vegetativo, seguido de un período seco para la maduración. Durante el período de crecimiento activo la lluvia estimula el rápido crecimiento de la caña, la elongación y la formación de entrenudos. Sin embargo, la ocurrencia de lluvias intensas durante el período de maduración no es recomendable, porque produce una pobre calidad de jugo, favorece el crecimiento vegetativo, la formación de cañas de agua y aumenta la humedad del tejido. Además, dificulta las operaciones de cosecha y transporte. Esto es común en algunos lugares del sureste de México donde se cultiva caña de azúcar.

Temperatura. El crecimiento está directamente relacionado con la temperatura. La temperatura óptima para la brotación (germinación) de los esquejes es 32°C a 38°C. La germinación disminuye bajo 25°C, llega a su máximo entre 30-34°C, se reduce por sobre los 35°C y se detiene cuando la temperatura sube sobre 38°C.

Temperaturas sobre 38°C reducen la tasa de fotosíntesis y aumentan la respiración. Por otro lado, para la maduración son preferibles temperaturas relativamente bajas, en el rango de 12-14°C, ya que ejercen una marcada influencia sobre la reducción de la tasa de crecimiento vegetativo y el enriquecimiento de azúcar de la caña. A temperaturas mayores la sacarosa puede degradarse en fructosa y glucosa, además de estimular la fotorrespiración, que produce una menor acumulación de azúcares. Por otro lado, condiciones severas de frío inhiben la brotación de las socas y reducen el crecimiento de la caña. El ataque del carbón y su diseminación es mayor a temperaturas ambientales de 25-30°C. De modo similar, la diseminación de la podredumbre roja es mayor a temperaturas altas (37-40°C) cuando las demás condiciones son similares. La incidencia de la marchitez es mayor cuando las temperaturas mínimas caen drásticamente. La incidencia de la mosca del tallo es alta en el verano, cuando las temperaturas del aire son más elevadas. También una mayor incidencia de la mosca del tallo ha sido observada cuando la diferencia entre la temperatura máxima (día) y mínima (noche) es pequeña.

Humedad Relativa. Durante el período del gran crecimiento condiciones de alta humedad (80 a 85%) favorecen una rápida elongación de la caña. Valores moderados, de 45-65%, acompañados de una disponibilidad limitada de agua, son beneficiosos durante la fase de maduración.

Luz Solar. La caña de azúcar es una planta que adora el sol. Crece bien en áreas que reciben energía solar de 18 a 36 MJ/m². Por ser una planta C₄ la caña de azúcar es





capaz de altas tasas fotosintéticas y este proceso tiene un alto valor de saturación de luz. El ahijamiento es influenciado por la intensidad y la duración de la radiación solar. Una alta intensidad y larga duración de la irradiación estimulan el ahijamiento, mientras que condiciones de clima nublado y días cortos lo afectan adversamente. El crecimiento del tallo aumenta cuando la luz diurna se extiende entre 10 a 14 días. El incremento del índice de área foliar es rápido durante el tercer y quinto mes de crecimiento, coincidiendo con la fase formativa del cultivo, y alcanza los valores máximos al comienzo de la fase del gran crecimiento.

2.3.2 Requerimientos edafológicos

Las condiciones ideales de suelo para el cultivo de la caña de azúcar son: suelo bien drenado, profundo, franco, con una densidad aparente de 1.1 a 1.2 g/cm³ (1.3 - 1.4 g/cm³ en suelos arenosos), con un adecuado equilibrio entre los poros de distintos tamaños, con porosidad total superior al 50%; una capa freática bajo los 1.5 a 2 m desde la superficie y una capacidad de retención de la humedad disponible del 15% o superior (15 cm por metro de profundidad del suelo).

El pH óptimo del suelo oscila entre 6.5 y 7.8, pero la caña de azúcar puede tolerar un rango considerable de acidez y alcalinidad del suelo. Por esta razón se cultiva caña de azúcar en suelos con pH entre 5.0 y 8.5. El encalado es necesario cuando el pH es inferior a 5.0, y la aplicación de yeso es necesaria cuando el pH sobrepasa 9.5. Las infestaciones por nematodos ocurren naturalmente en suelos muy arenosos.

Los suelos salinos y sódicos son muy comunes en las áreas de cultivo de la caña de azúcar en todo el mundo. Un suelo con conductividad eléctrica (CEe) bajo 2 dS/m no afecta considerablemente al crecimiento de la planta. La caña de azúcar es moderadamente sensible a la salinidad del suelo. La reducción del rendimiento del cultivo varía según el nivel de salinidad del suelo. La reducción del rendimiento del cultivo es de 0% con una CEe de 1.7 dS/m; 10% con CEe de 3.3 dS/m; 25% con CEe de 6.0; 50% con CEe de 10.4 y 100% con CEe de 18.6 dS/m. La salinidad del suelo también afecta adversamente al contenido de humedad de las vainas y al contenido de nitrógeno.

En suelos con condiciones ácidas (pH menor a 5.2), el Al reemplaza al Ca en el complejo de intercambio catiónico. La toxicidad por Al ocurre en suelos minerales en los que el Al representa sobre el 30% de la capacidad de intercambio catiónico.





2.3.3 Consideraciones generales

La recuperación de azúcar es mayor cuando el clima es seco, con poca humedad, con varias horas de luz solar, noches frescas, con amplia variación diurna y poquísima lluvia durante el período de maduración. Estas condiciones favorecen una mayor acumulación de azúcar.

La temperatura, la humedad y la luminosidad, son los principales factores del clima que controlan el desarrollo de la caña. La caña de azúcar es una planta tropical y se desarrolla mejor en lugares calientes y soleados, se tienen reportes de que a bajas temperaturas todas las variedades de caña tienen una menor eficiencia y más baja proporción de desarrollo.

Es indispensable también proporcionar una adecuada cantidad de agua a la caña durante su desarrollo vegetativo, para que permita la absorción, transporte y asimilación de los nutrientes. La luz juega un papel muy importante, como principal fuente de energía de la caña de azúcar en el almacenamiento de la sacarosa. A menor luminosidad menor almacenamiento de azúcares.

2.4 Paquete tecnológico del cultivo de la caña de azúcar aplicado por el Ingenio Huixtla

Es importante señalar que el módulo de drenaje subterráneo parcelario subterráneo controlado se instaló en agosto del 2003. A la fecha tiene 16 años de funcionamiento y está en buenas condiciones. Con base en la experiencia y diagnósticos realizados por los técnicos del Ingenio de Huixtla, se tiene un paquete tecnológico que es aplicado y recomendado a toda la zona cañera.

En el manejo del cultivo en la parcela demostrativa lo lleva a cabo el Ingenio de Huixtla y está a cargo del Ing. Rodolfo Arroyave. El manejo del módulo demostrativo se tiene en cuenta los lineamientos siguientes:

Siembra. La última siembra fue el año 2016, la cosecha de la plantilla se realizó a los 8 meses se utilizó para semilla. la siembra se efectuó en la primera semana de febrero utilizando el método de doble cordón, es decir dos cañas de tres yemas cada una sobre el surco empleando aproximadamente 12 ton/ha de semilla de la variedad temprana CP 72-2086, la separación entre surcos utilizada es de 1.40 m, el tapado de la semilla se realizó utilizando azadón, la profundidad de siembra oscila entre 20 a 25 cm, la semilla





quedó cubierta con 5 cm de suelo debido a que una capa más gruesa retrasa la emergencia y a menudo ocasiona la mortalidad de la semilla. Existen diferentes modalidades de siembra como son cadena simple, y simple traslapada, cadena doble simple y doble traslapada. En 2019 el cultivo se encuentra en segunda resoca.

Cosecha. La cosecha de la caña de azúcar se realizó, en forma mecánica, el 20 de febrero de 2019 y se obtuvo una producción de 110 ton/ha.

Destronque. Se realizó el 21 de febrero, se eliminaron residuos de cosecha para facilitar los trabajos de cultivo que se requerirán en su oportunidad. Después se procede a eliminar los troncos de tallos sobrantes de la cosecha, haciéndose al ras del suelo con machete de manera manual para estimular que los nuevos brotes surjan debajo de la superficie del suelo ocasionando mayor vigor a los nuevos tallos.

Cultivo de puntas. Consiste en rotular el suelo con la finalidad de descompactar lo debido a su formación del paso de diferentes maquinarias durante la zafra, labor que se realizó el 16 de marzo, esta labor facilita la exposición de los huevecillos de la mosca pinta o salivazo y se mueran al exponerlos a las temperaturas altas del ambiente.

Resiembra. Se realizó el 5 de mayo específicamente en donde la planta había sido muy afectada por el paso de maquinaria. Se utilizó semilla de la variedad temprana CP 72-2086 empleando un azadón. La profundidad de siembra oscila entre 20 a 25 cm, la semilla quedó cubierta con 5 cm de suelo.

Remoción de los Chupones. Los chupones son los últimos macollos o brotes laterales en formarse, siendo robustos y de rápido crecimiento. Se forman principalmente debido a un abundante suministro de agua, a un aporcamiento inadecuado y a una fertirrigación tardía. Estos chupones, como su nombre lo indica, contienen mucha agua y poca sacarosa, y tienen un mayor contenido de azúcares reductores. Los chupones afectan al crecimiento de los tallos adyacentes. Ellos hospedan plagas y cuando son cosechados y enviados al ingenio para triturarlos, producen un jugo de mala calidad, lo que afecta la recuperación del azúcar. Los chupones pueden ser utilizados como alimento para el ganado.

Fertilización y cultivo mecánico. La primera fertilización del 2019 se realizó el 18 de mayo con un tractor de ferticultivo y con una dosis de urea nitrógeno de 200 kg/ha. La segunda aplicación se realizó en forma manual y se utilizó la fórmula 23-05-27 (N, P, K) y se llevó a cabo el 7 de junio.





Mosca pinta o salivazo: *Aenolamia spp.* Los insectos adultos pican las hojas de la caña para succionar la savia y a su vez, inyectan un líquido cáustico (toxina) en el parénquima, produciendo una rayita de color amarillo-rojizo en el punto de succión como de 2 – 3 mm de largo se extiende y adquiere una coloración más oscura, hasta que se tornan manchas mayores de 1 cm. La caña comienza a "aguachinarse", las puntas de las hojas se tuercen, se ponen tristes, como si estuvieran sufriendo por sequía. Se estima que una población de 10 insectos adultos por cepa puede causar una merma de 3 - 6 ton de caña/ha.

El éxito para el control de esta plaga consiste en que se haga en la fecha oportuna, eliminando la primera generación con aplicaciones con bomba de motor, procurando que el polvo caiga en el tronco de las plantas y alrededor de las cepas, es recomendable una segunda aplicación veinte días después de la primera. Cuando el campo ha cerrado, es preferible hacer los tratamientos con avión y de 7 a 10 de la mañana. Los insecticidas más comunes usados son: Carbaryl 80%, 1 a 2 kg/ha., Monocrotofos y Clorpirifos en dosis de 1.5 lt/ha, una forma de mantener estable la población es el Manejo Integrado de Plagas (MIP), compuesto por: i) Control Biológico; aplicación de entomopatógenos (Hongo *Metarhizium spp.*). ii) Control Cultural; consiste en mantener libre de maleza al cultivo y iii) Control Mecánico; consiste en realizar labores de subsuelo y cultivo para remover el suelo y exponer huevecillos a la intemperie.

Roedores, los roedores atacan a la caña y a otros cultivos comerciales como maíz, sorgo, arroz, cebada, melón, tomate, etc., en lugares donde predominan potreros y extensas áreas enmontadas, los roedores pasan gran parte de su vida en estos sitios y al llegar la temporada seca, cuando no tienen suficiente alimento en su hábitat natural, emigran a los cañaverales.

El método de control consiste en determinar el índice de población de roedores mediante trampeos. Iniciar el combate con un cebo de acción rápida para disminuir la población. Repetir el trampeo 30 días después y si la infestación lo amerita, hacer una segunda aplicación con un cebo como el Fosforo de Zinc de acción lenta. Tres meses después volver a trampear y si aun la población rebasa el índice de 8%, efectuar una tercera aplicación de cebos envenenados. La campaña se debe realizar durante la temporada de sequía, de lo contrario habrá menos eficiencia.





Riegos. Se recomiendan tres a cuatro riegos después de la ausencia de lluvias. Por lo general se darían dos riegos, por contar con un sistema de drenaje subterráneo parcelario controlado, pero como en el presente año fue un año atípico (seco) se darán tres riegos. El sistema de riego con que se cuenta es un cañón viajero.

Drenaje subterráneo. La parcela demostrativa cuenta con un sistema de drenaje subterráneo parcelario controlado.

La preparación del cultivo se inicia con el subsoleo, que es requerido para romper las capas compactadas del suelo, este se realiza con maquinaria y el trazo debe estar en contra de la pendiente natural del terreno, para evitar que se formen zanjas que propicien la erosión hídrica. Posteriormente se da un paso de arado para voltear la tierra y luego se da un paso de rastra para emparejar el terreno y dejarlo fino y firme para facilitar la entrada de la maquinaria que forma los surcos.

Después se selecciona la semilla y se requieren de 12 a 15 ton/ha. La semilla (es un pedazo de tallo que el productor elige desde donde retoñará la caña), se coloca sobre el terreno y la maquinaria se encarga de cubrirla de tierra. La profundidad de siembra va de los 40 a 50 cm. Y la distancia entre surcos es de 1.30 m de ancho. La mejor fecha de siembra de caña es de noviembre a enero. En la zona del Ingenio Huixtla, la caña de azúcar es un cultivo perenne que dura entre 8 y 9 años, antes que requiera volver a plantarse. La Soca, se le llama a la caña que rebrota por segunda vez para volver a producir. La Resoca, se le llama al cultivo que vuelve a brotar a partir del tercer año y hasta que sea requerido volver a plantar semilla nueva.

Al momento de la siembra se aplica fertilizante *Triple 16*, que contiene un balance bien equilibrado de nutrientes (16%N-16%P-16%K) y con una concentración total alta (48%) y que es ideal para aplicaciones de inicio o de arranque del cultivo. La caña requiere de aplicaciones del orden de 500 kg/ha. Posteriormente se aplica Urea a los dos meses, fertilización que coincide con el riego de asiento. Se aplican seis riegos por hectárea/año en la caña, por lo que la frecuencia de riego es de aproximadamente cada 2 meses.

Las características de crecimiento de la caña de azúcar hacen que tenga requerimientos hídricos mayores a la de la mayoría de los cultivos. Entre un 50 a 70% de su sistema de raíces se desarrollan en los primeros 30 cm de profundidad del suelo, pero si no encuentra agua, entonces sus raíces profundizaran más en busca de humedad, y esto va a en detrimento de su desarrollo y rendimiento, por lo que el manejo del agua es sumamente importante.

Cuando se cuenta con riego, se aplican 6 riegos/ha/año, pero es muy importante conocer el requerimiento hídrico del cultivo, para poder aplicar las láminas de riego que





el cultivo va demandando, en la cantidad adecuada, con la frecuencia necesaria y con la oportunidad requerida. Cuando no se puede tener un manejo controlado del agua para abastecer la demanda del cultivo, según el estado fenológico en que se encuentre, se afectará el desarrollo de la caña y también su rendimiento.

Un mal manejo del agua de riego durante la etapa vegetativa, causará problemas, pues se disminuye la tasa de oxigenación en la zona radicular y se afectará también la absorción de nutrientes. Sin embargo un estrés hídrico moderado antes de la cosecha de la caña, es necesario. Por lo que entre un mes y mes y medio antes de la cosecha se deben suspender los riegos, a fin de retardar la floración y aumentar la acumulación de sacarosa en los entrenudos de la caña.



3. METODOLOGÍA

En la zona de influencia del Ingenio Huixtla, Chiapas, existe un período seco durante los meses de enero a abril, lo que causa un déficit de humedad que afecta el desarrollo y rendimiento de la caña. Mientras que en los meses de junio a octubre se presentan altas precipitaciones, que provocan excedentes de agua que el suelo y el cultivo no pueden absorber (**Ilustración 9**), por lo que estos excedentes deben ser evacuados para no ocasionar daños a las cosechas.

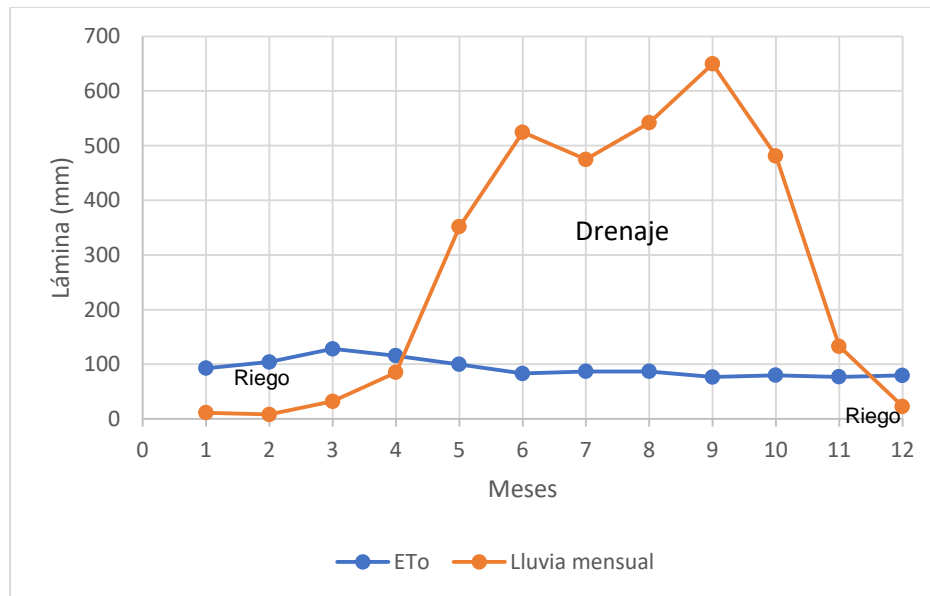


Ilustración 9. Balance Hídrico para la zona cañera

Bajo este contexto se planteó realizar la evaluación agrohidráulica y económica de un sistema de drenaje controlado en una parcela experimental ubicada en el área de influencia del Ingenio Huixtla, sembrada con caña de azúcar, con el objetivo de determinar si este tipo de tecnologías son factibles de aplicar en la zona y resultan redituables su implementación.

La evaluación agronómica consiste en la determinación del grado del desarrollo del cultivo y los rendimientos. La evaluación hidráulica se realiza para analizar el comportamiento del sistema de drenaje controlado ante un evento de lluvia copiosa, en el que se registra la descarga o salida de los excedentes de agua además de la carga hidráulica sobre los drenes. Para esta evaluación es necesario instalar piezómetros, pozos de observación, realizar mediciones de la dinámica del manto freático y determinar las propiedades físico-químicas e hidrodinámicas del suelo.

La parcela se seleccionó considerando que fuera representativa en cuanto a tipo de suelo, clima y presencia de manto freático, del área de influencia del Distrito de



Temporal Tecnificado 018 Huixtla, Chiapas. La parcela posee una superficie de 6.06 ha, se encuentra ubicada en los campos de cultivo del Ingenio Cañero de Huixtla, Chiapas, en el municipio del mismo nombre. Pertenece al Rancho Fomento Azucarero, Sociedad de Producción Rural de Responsabilidad Limitada de Capital Variable. Asentada en el Lote 7122 y corresponde a la tabla 19 con una superficie de 6.06 hectáreas (**Ilustración 10**). La parcela posee una textura de suelos franco-limosa, con un pH de 6.0. Además tiene un sistema de riego por aspersión, para la aplicación de los riegos de auxilio.

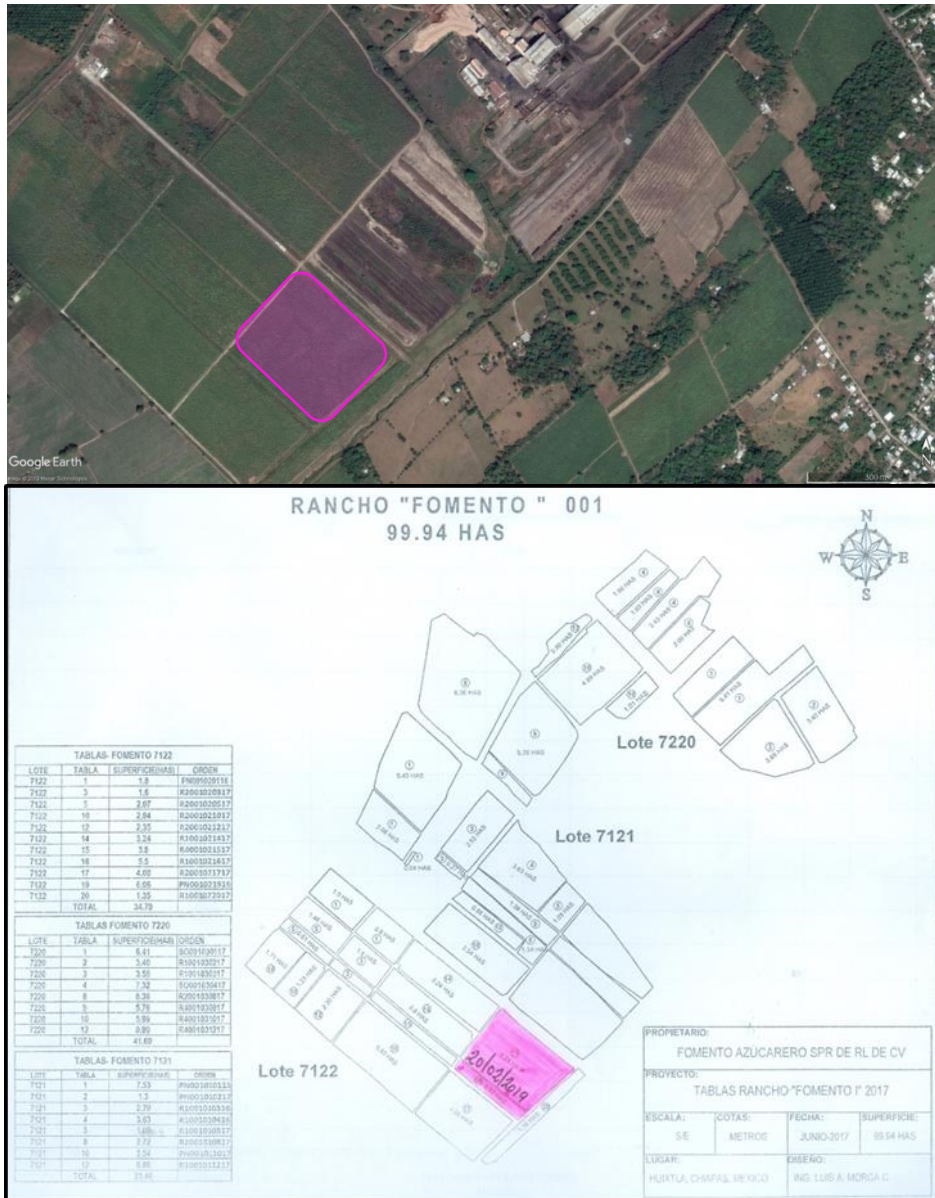


Ilustración 10. Ubicación del modulo demostrativo con drenaje subterráneo controlado, dentro del Rancho Fomento 001.





3.1. Evaluación agronómica

La respuesta que se tenga en el incremento del rendimiento de los cultivos, como resultado de la instalación del sistema de drenaje es el factor que más interesa al agricultor. Esta misma respuesta es el mejor indicador del funcionamiento del sistema de drenaje, siempre y cuando se hallan atendido correctamente otros aspectos del proceso productivo como: la aplicación de fertilizantes, el control de plagas y enfermedades, entre otros. También, se debe tener cuidado de no confundir el efecto del funcionamiento inadecuado del sistema de drenaje con otras causas como: lentes compactos de arcilla, acuíferos semiconfinados y mineralización del suelo.

Con el propósito de distinguir los efectos del funcionamiento del sistema de drenaje sobre el desarrollo del cultivo de caña de azúcar de aquellos derivados de alguna deficiencia en el manejo agronómico del cultivo, es recomendable seguir la guía técnica para el manejo de este cultivo proporcionada por el Ingenio Huixtla.

Para la región en la cual se ubica la parcela demostrativa se tiene una temperatura media anual de 26 °C, la precipitación media anual es de 2346 mm, en particular el suelo de la parcela demostrativa es de textura franco a franco-limosa, con pH medio de 6.0, en otras palabras se reúnen los requisitos climáticos y edáficos básicos para el buen desarrollo de la caña de azúcar. La única limitante edáfica puede ser aquella derivada del drenaje interno del suelo deficiente, lo cual puede afectar el contenido de sacarosa de la caña, es decir es conveniente la instalación de sistemas de drenaje para evacuar el exceso de agua del perfil del suelo en las fases finales del ciclo vegetativo, con lo cual se propicia el incremento en la producción de sacarosa.

En el manejo del cultivo de caña de azúcar, en la parcela demostrativa se tuvo en cuenta el paquete tecnológico que marca los siguientes conceptos:

Preparación de suelos. El terreno se subsoleó a una profundidad media de 50 cm a fines de octubre, lo cual tiene por objeto romper estratos o capas compactas del suelo situadas por debajo del nivel de corte del arado, para que la planta desarrolle un sistema radicular más profundo y extenso que ayude a un mejor desarrollo y producción. Posteriormente, se realizaron barbechos cruzados a 40 cm de profundidad con el objetivo de romper y descompactar el suelo a la vez que se destruye e incorporan las malezas y los residuos de cosechas anteriores. Se ejecutó un rastreo cruzado a 25 cm de profundidad para romper los grandes terrones que deja la aradura y que obstaculizan las posteriores labores de labranza y siembra. Se realizó un emparejamiento para mejorar la eficiencia del riego y del drenaje superficial, inmediatamente después se efectuó el surcado que es la última labor de la preparación de suelo para la siembra, su trazado, se hace en función del riego, del drenaje superficial y de la mecanización del cultivo particularmente para la cosecha.





Siembra y fertilización. La siembra se efectuó en la primera semana de noviembre utilizando el método de doble cordón, es decir dos cañas de tres yemas cada una sobre el surco empleando aproximadamente 12 ton/ha de semilla de la variedad temprana CP 72-2086, la separación entre surcos utilizada es de 1.40 m, el tapado de la semilla se realizó utilizando azadón, la profundidad de siembra oscila entre 20 a 25 cm, con una distancia entre surco de 140 cm, la semilla quedó cubierta con 5 cm de suelo debido a que una capa más gruesa retrasa la emergencia y a menudo ocasiona la mortalidad de la semilla. Existen diferentes modalidades de siembra como son cadena simple, y simple traslapada, cadena doble simple y doble traslapada. Se recomienda utilizar cadena simple traslapada, con el objetivo de evitar las altas densidades poblacionales, reduciendo así la competencia por el agua y los nutrientes del suelo. La fórmula de fertilización utilizada fue 23-05-27 (N, P, K) en una sola aplicación realizada durante la siembra.

La germinación del cultivo ha sido altamente eficiente, es importante señalar que la instalación del sistema de drenaje en el modulo demostrativo permitió efectuar la siembra 20 días antes, en relación con una parcela testigo aledaña en la cual no se cuenta con drenaje agrícola.

3.1.1 Diagnóstico edafoclimático

La estación climatológica No.07077 Huixtla, Huixtla administrada por CONAGUA, registra una precipitación media anual de 3,313 mm durante el periodo comprendido de julio de 1954 a octubre 2019. La temperatura máxima promedio anual de 35.2°C y una temperatura mínima promedio de 21.6°C (**Ilustración 11**). La evaporación máxima promedio anual de 173.2 mm y la mínima promedio anual de 92.6 mm. Los suelos son francos, franco arcillo limoso y franco arenoso; el pH es moderadamente ácido, ligeramente ácido y neutro. Se tienen 30,000 ha con manto freático somero en las épocas de lluvias, a pesar de contar con 433 km de drenes principales, secundarios y terciarios.

La distribución de la lluvia observada en el área cañera del Ingenio Huixtla en 17 estaciones pluviométricas correspondiente para el año 2019 indica que en la estación Tesorito, El Encanto I y El Encanto III la precipitación anual oscila de 984, 1,300 y 1,213 mm, respectivamente (**Tabla 4 e Ilustración 12**). La estación Huixtla operada por CONAGUA registra valores de lluvia de mayo a octubre 2019 de 3,163 mm y la estación de Fomento operada por el Ingenio registra un total de 2,023 mm, una diferencia de 1,140 mm (**Ilustración 13**). Estas estaciones se encuentran a una distancia de 7.5 km.



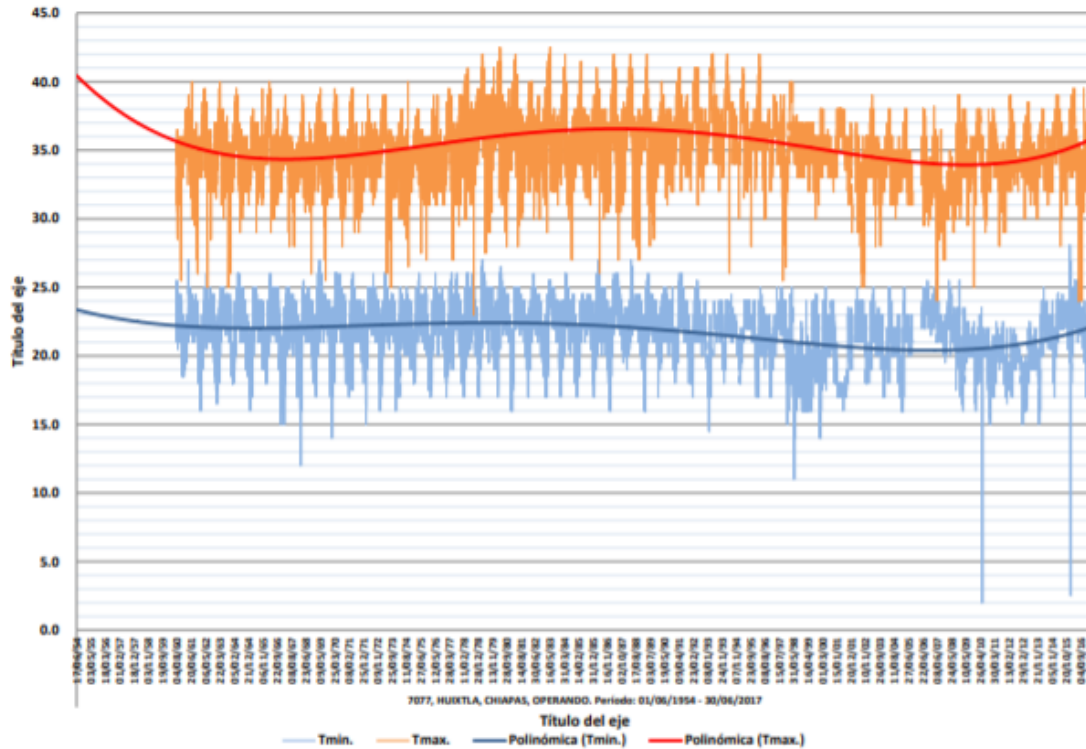


Ilustración 11. Comportamiento de la temperatura en el área cañera de Ingenio Huixtla.

Tabla 4. Datos de Estaciones pluviométricas operadas por el Ingenio Huixtla, año 2019.

Mes	Fomento	La Fortuna	Tesorito	Fortin	Marfil	Valle Verde	Los Angeles	El Encanto I	El Encanto III	Providencia Casco	Providencia Empacadora	Relicario L2	Relicario L3	Relicario L4	Excelencia	Palma Sola	Laureles
ENERO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FEBRERO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MARZO	0	3.8	7.2	0	18	0	7	0	25	0	0	0	0	0	0	0	0
ABRIL	3	0	10	45	0	0	38	0	57	0	0	0	0	0	0	0	0
MAYO	237.7	258	307	333.7	462	184	313.5	348	317	350.6	293	304	297	298	229.5	178.5	102
JUNIO	262	326	176	338.3	428.5	386.9	364	212	106	348	289	441	435	479	358.2	320.5	284
JULIO	215	213	0	187.5	285	333	248	62	78	268	228	322	307	279	262.9	225	268
AGOSTO	503	210	0	618.4	628	440	554	165	139	378	311	422	361	372	339	329	335
SEPTIEMBRE	459	453	137	555.2	437	572	482.5	337	336	565	453	399	388	403.1	417.7	421	383
OCTUBRE	346.5	375	347.5	408.8	306	302	432.6	183	155	358	257	319	229	239	258.1	334	281
NOVIEMBRE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DICIEMBRE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	2,026.20	1,838.80	984.70	2,486.90	2,564.50	2,217.90	2,439.60	1,307.00	1,213.00	2,267.60	1,831.00	2,207.00	2,017.00	2,070.10	1,865.40	1,808.00	1,653.00



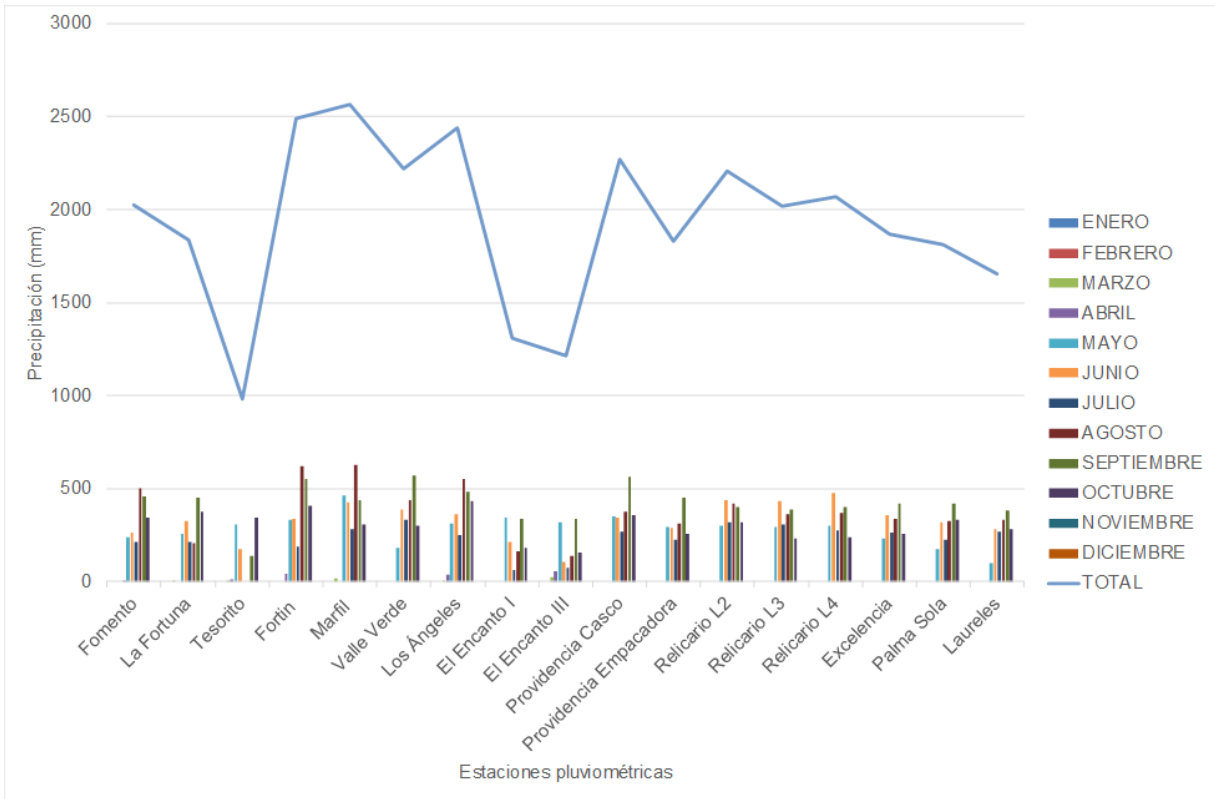


Ilustración 12. Comportamiento de la precipitación, año 2019.

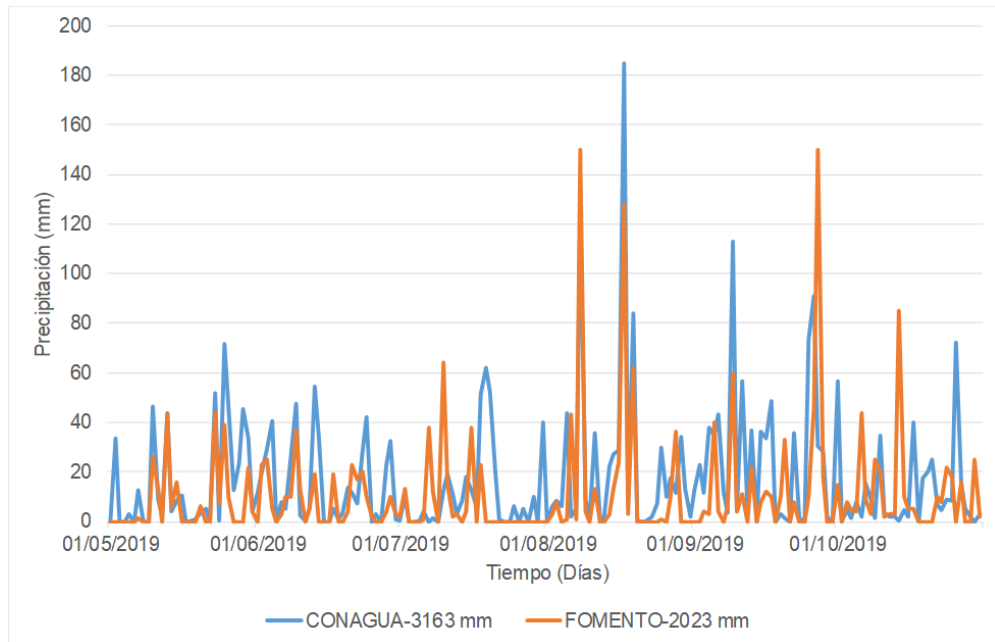


Ilustración 13. Precipitación entre la estación Huixtla y la Estación Fomento, año 2019.





En un análisis de frecuencia se analiza que en 17 años, de 1954 a 1971, la cantidad de lluvia total es de 90% del total, de 1971 a 2005 en 34 años la precipitación total en la estación Huixtla es de un 85% del total, o sea que en 51 años la precipitación ha disminuido en 5% del total acumulativo. Para el 2005 al 2022 con una tendencia de frecuencia de 17 años, tendríamos una disminución del 30% del total acumulativo (**Ilustración 14**).

La precipitación tiene una tendencia a la baja quizás hasta un 30%, la temperatura máxima y mínima se encuentra relativamente por encima de los rangos que se recomiendan para el buen desarrollo del cultivo de la caña de azúcar. En el cultivo de caña de azúcar, se recomienda una humedad relativamente alta y baja en la etapa de maduración. Estas variables climáticas no las podemos cambiar, pero si podemos manejarlas a través de una tecnología del drenaje subterráneo parcelario controlado.

La única limitante edáfica puede ser aquella derivada del drenaje interno del suelo deficiente, lo cual puede afectar el contenido de sacarosa de la caña, por lo que es conveniente la instalación de Tecnología de sistemas de drenaje tanto superficial como subterráneo, con la finalidad de evacuar el exceso de agua del perfil del suelo en las fases finales del ciclo vegetativo, con lo cual se propicia el incremento en la producción de sacarosa.

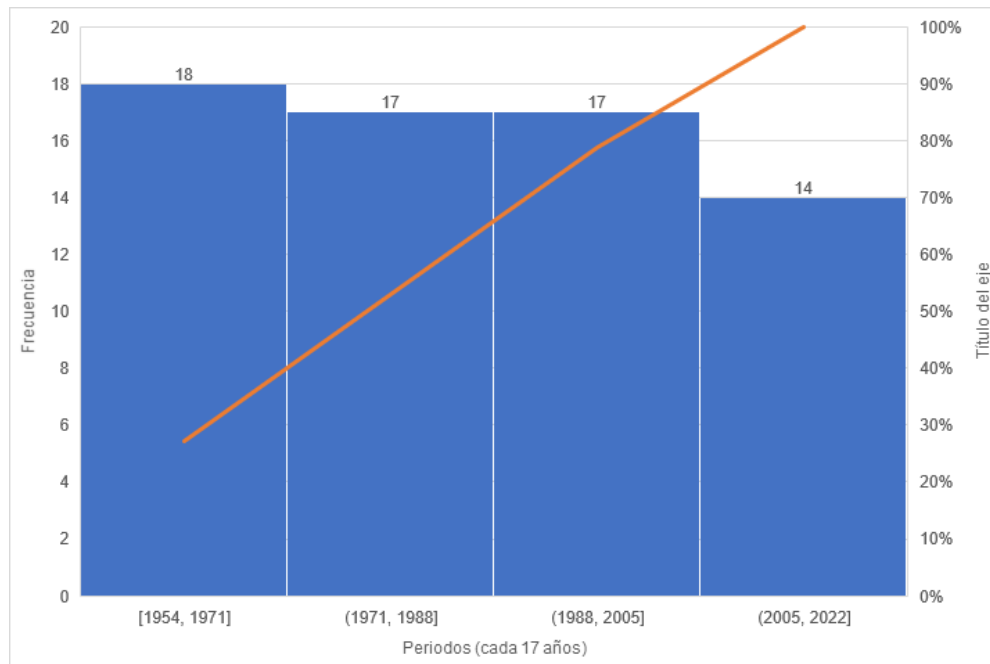


Ilustración 14. Análisis de frecuencia de la lluvia de la Estación Huixtla, Chiapas.





3.2. Evaluación hidráulica

Como ya se mencionó, la evaluación hidráulica consiste en analizar el comportamiento del sistema de drenaje controlado ante un evento de lluvia copiosa, en el que se registra la descarga o salida de los excedentes de agua además de la carga hidráulica sobre los drenes. Para esta evaluación es necesario tomar muestras de suelo a las que se aplican análisis fisicoquímicos, instalar piezómetros y pozos de observación, realizar mediciones de la dinámica del manto freático y del gasto drenado, y determinar las propiedades hidrodinámicas del suelo. La transferencia de agua en las zonas no saturada del suelo se abordó aquí con el uso de un modelo de base física, basado en la ecuación de Boussinesq, para predecir su comportamiento temporal y espacial, al cual se introducen parámetros obtenidos de los análisis de suelo. Además, el sistema de drenaje debe estar en condiciones que permitan realizar una adecuada operación, por lo que deben considerarse las acciones de mantenimiento necesarias. A continuación se describe la metodología seguida para relizar la evaluación hidráulica.

3.2.1 Propiedades físico-químicas e hidrodinámicas del suelo

En la parcela se realizaron 9 perforaciones y se tomaron muestras de suelo en las siguientes profundidades: 0-30 cm, 30-60 cm, 60-100 cm (**Ilustración 15**). Las muestras fueron empaquetadas y transportadas al laboratorio para su posterior análisis físico-químico, cuyos resultados se muestran en la **Tabla 5** y la **Tabla 6**. Las texturas predominantes del suelo de 0 a 100 cm de profundidad son franco limosa y franco arcillosa (**Ilustración 15**). En la **Ilustración 16** se muestra la localización en planta del sitio en donde se relizaron los muestreos y se ubicaron los pozos de observación del nivel freático.

Con base al análisis fisicoquímico de los suelos, la textura el módulo de drenaje varia de franco a franco limoso. El pH oscila de 6.50 a 6.80 y el PSI es menor de cero, por lo que se toma como cero, además la CE varía de 0.1 a 0.2. Con estos valores reportados por los análisis fisicoquímicos de suelos, se dictamina que son aptos para el cultivo de la caña de azúcar.

Para sustentar los resultados antes expuestos, se establecen las directrices para clasificar suelos por salinidad o sodicidad (**Tabla 7**):

Suelos Normales. Son suelos de buena calidad agronómica y donde las plantas presentan buen desarrollo y se obtienen buena producción.

Suelos salinos. Contienen suficientes sales como para limitar el crecimiento de algunos cultivos por disminución en el potencial hídrico total. Los cultivos presentan síntomas de estrés hídrico, y toxicidad de iones: Cl, B, HCO₃, SO₄ a tallos y raíces.





a)



b)

Ilustración 15. Perforación del pozo para toma de muestras de suelo.

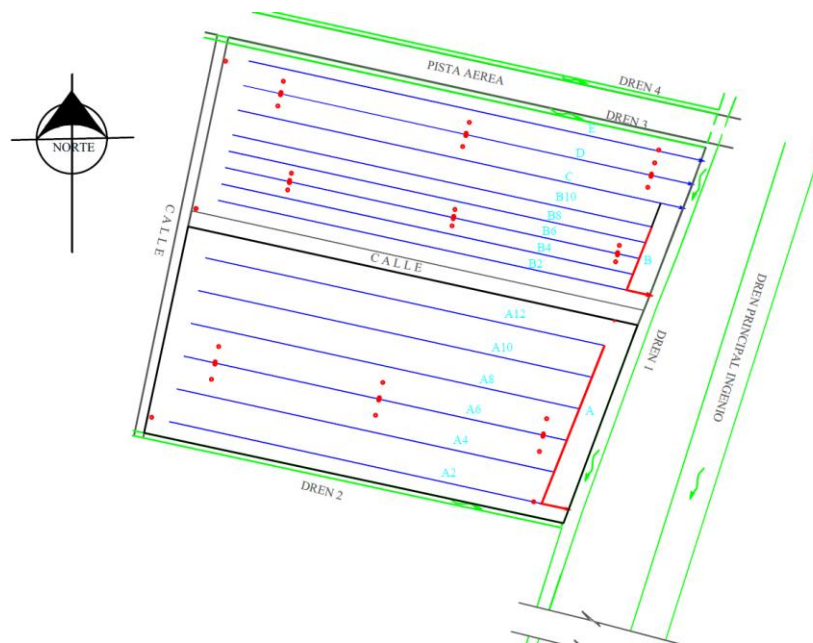


Ilustración 16. Localización de los pozos de observación de nivel freático y muestreo de suelos.

**Tabla 5. Resultados de los análisis físico-químicos de muestras de suelo tomadas en el modulo demostrativo de drenaje subterráneo controlado**

REFERENCIA	CiCe	D A	Cationes (meq/L)					Aniones (meq/L)					pH	C.E. dS/m	Mn	Fe	B	%			TEXTURA
	meq/100gr	g/cm3	Na	K	Ca	Mg	Σ Cat	S-SO ₄	Cloruros	CO ₃	HCO ₃	Σ Ani						mg/l	ARENA	LIMO	
A 2-1 0-30cm L-20	17.00	0.66	0.1	0.9	0.8	0.6	2.4	1.0	1.1	0.0	0.01	2.1	6.50	0.20	15	40	0.2	11.92	47.44	40.64	FRANCO
A 2-1 30-60cm L20	8.00	0.76	0.1	0.1	0.7	0.5	1.4	0.6	0.8	0.0	0.01	1.4	6.70	0.12	10	50	0.1	11.92	51.44	36.64	FRANCO LIMOSO
A 2-1 60-100cm L20	0.75	0.87	0.01	0.01	0.01	0.10	0.13	0.02	0.10	0.0	0.01	0.12	6.65	0.10	25	15	0.1	17.92	33.44	48.64	FRANCO
B 2-1 0-30cm L10	13.50	0.82	0.1	0.6	0.5	0.8	2.0	0.8	1.3	0.0	0.01	2.1	6.50	0.19	20	9	0.2	13.92	49.44	36.64	FRANCO LIMOSO
B 2-1 30-60cm L10	10.90	0.74	0.6	0.2	0.3	0.7	1.8	0.6	1.1	0.0	0.01	1.7	6.60	0.16	15	12	0.1	13.92	53.44	32.64	FRANCO LIMOSO
B 2-1 60-100cm L10	9.00	0.82	0.5	0.1	0.1	0.5	1.2	0.2	1.0	0.0	0.01	1.2	6.70	0.12	20	55	0.1	25.92	47.44	26.64	FRANCO
D 1-1 0-30cm L15	15.60	0.70	0.6	0.6	0.2	0.5	1.9	0.7	0.6	0.0	0.01	1.3	6.60	0.12	15	45	0.1	13.92	47.44	38.64	FRANCO
D 1-1 30-60cm L10	8.00	0.81	0.3	0.1	0.3	0.5	1.3	0.7	0.2	0.0	0.01	0.9	6.80	0.10	15	7	0.2	15.92	37.44	46.64	FRANCO
D 1-1 60-100cm L15	9.50	0.90	0.4	0.1	0.2	0.7	1.4	0.6	0.5	0.0	0.01	1.1	6.70	0.10	10	11	0.1	13.92	39.44	46.64	FRANCO
D 2-1 0-30cm L15	14.50	0.83	0.5	0.6	0.2	0.5	1.8	0.7	0.6	0.0	0.01	1.3	6.60	0.17	20	40	0.2	19.92	39.44	40.64	FRANCO
D 2-1 30-60cm L15	9.50	0.86	0.2	0.4	0.2	0.5	1.3	0.5	0.8	0.0	0.01	1.3	6.60	0.13	30	20	0.2	19.92	39.44	40.64	FRANCO
D 2-1 60-100cm L15	14.50	0.91	0.5	0.5	0.2	0.7	1.9	0.8	0.9	0.0	0.01	1.7	6.80	0.20	25	45	0.1	15.92	35.44	48.64	FRANCO
D 3-1 0-30cm L15	12.50	0.78	0.4	0.5	0.4	0.2	1.5	0.9	0.3	0.0	0.01	1.7	6.70	0.16	10	8	0.2	15.92	45.44	38.64	FRANCO
D 3-1 30-60cm L15	14.50	0.95	0.7	0.5	0.4	0.1	1.7	0.5	0.8	0.0	0.01	1.3	6.60	0.14	20	6	0.1	17.92	31.44	50.64	FRANCO
D 3-1 60-100cm L15	14.50	0.87	0.9	0.2	0.3	0.4	1.8	0.7	0.6	0.0	0.01	1.2	6.70	0.16	25	8	0.2	17.92	43.44	38.64	FRANCO

Tabla 6. Diagnóstico de la salinidad o acidez del suelo

REFERENCIA	C.E. (dS/m)	PSI	pH	Diagnóstico
A 2-1 0-30cm L-20	0.20	-0.97	6.50	Buena permeabilidad, aeración y con buena estructura
A 2-1 30-60cm L20	0.12	-1.09	6.70	Buena permeabilidad, aeración y con buena estructura
A 2-1 60-100cm L20	0.10	-1.13	6.65	Buena permeabilidad, aeración y con buena estructura
B 2-1 0-30cm L10	0.19	-0.99	6.50	Buena permeabilidad, aeración y con buena estructura
B 2-1 30-60cm L10	0.16	-1.03	6.60	Buena permeabilidad, aeración y con buena estructura
B 2-1 60-100cm L10	0.12	-1.09	6.70	Buena permeabilidad, aeración y con buena estructura
D 1-1 0-30cm L15	0.12	-1.09	6.60	Buena permeabilidad, aeración y con buena estructura
D 1-1 30-60cm L10	0.10	-1.13	6.80	Buena permeabilidad, aeración y con buena estructura
D 1-1 60-100cm L15	0.10	-1.13	6.70	Buena permeabilidad, aeración y con buena estructura
D 2-1 0-30cm L15	0.17	-1.02	6.60	Buena permeabilidad, aeración y con buena estructura
D 2-1 30-60cm L15	0.13	-1.08	6.60	Buena permeabilidad, aeración y con buena estructura
D 2-1 60-100cm L15	0.20	-0.97	6.80	Buena permeabilidad, aeración y con buena estructura
D 3-1 0-30cm L15	0.16	-1.03	6.70	Buena permeabilidad, aeración y con buena estructura
D 3-1 30-60cm L15	0.14	-1.06	6.60	Buena permeabilidad, aeración y con buena estructura
D 3-1 60-100cm L15	0.16	-1.03	6.70	Buena permeabilidad, aeración y con buena estructura



Tabla 7. Directrices para evaluar suelos salinos sódicos o calcáreos.

SUELO	CE (dS/m)	PSI (%)	pH	OBSERVACIONES
Normales	< 4	< 15	6.5-7.5	Buena permeabilidad, aeración y con buena estructura.
Salinos	> 4	< 15	7.5-8.5	Se les reconoce por la presencia de costras blancas en su superficie.
Salino-sódicos	> 4	> 15	> 8.5	Cuando estos suelos contienen calcio, se disuelve y reemplaza al sodio intercambiable, el cual es eliminado en forma simultánea con el exceso de sales.
Sódicos	< 4	> 15	8.5-10.0	Mala permeabilidad, difícil de trabajar y alta defloculación de sus partículas.
Calcáreos	<4	<15	7.3-8.4	Contienen carbonatos libres que influyen en ciertas prácticas de manejo del cultivo.

Raíces negras o deterioradas, quemaduras en las puntas de las hojas. Desbalances iónicos nutricionales que conducen a deficiencias de: Ca, K, NO₃, Mg, Mn, P.

Suelos sódicos. Contienen cantidades excesivas de sodio (Na) en los sitios de intercambio, las cuales dispersan las partículas de suelo, materia orgánica y arcillas; ocasionando reducción o pérdida de la estructura del suelo. Limita el movimiento de aire y agua, lo que trae como consecuencia la disminución de infiltración, percolación y drenaje deficiente. El Na reemplaza los cationes divalentes y el Na adsorbido está hidratado y aumenta la electronegatividad hasta que las partículas se repelen. Toxicidad de iones: Na, Cl, B, HCO₃, SO₄, en tallos y raíces; así como quemaduras en las puntas de las hojas, desbalances iónicos que conducen a deficiencias de: Ca, K, NO₃, Mg, Mn, P. En el suelo el pH es alto, mayor de 8.5.

Suelos salino-sódicos. Contienen suficientes sales como para limitar el crecimiento de algunos cultivos y cantidades excesivas de Na en los sitios de intercambio. Los cultivos pueden ser afectados por exceso de sales y Na, pero generalmente drenan muy bien. Las sales proveen cationes en exceso que se adsorben a coloides negativamente cargadas, reduciendo la tendencia a dispersarse. Estos se pueden convertir en suelos sódicos fácilmente y presentan los mismos problemas de los suelos salinos.



Suelos calcáreos. Contienen CaCO_3 libre, y no necesariamente son salinos ni salino-sódicos. La presencia de carbonatos libres influye en ciertas prácticas de manejo como el uso de herbicidas, aplicación de P y la disponibilidad de micronutrientes. El reducir el pH de estos suelos usualmente no es económico, pero se utilizaría azufre. Presentan colores grises a blancos, reflejan la presencia de contenidos importantes de cuarzo, caolinita u otras arcillas silicatadas, carbonatos de calcio o magnesio, yeso y sales; indicando en la mayoría de los casos mal drenaje y bajos contenidos de coloides como la arcilla y el humus.

Otras propiedades fisicoquímicas de los suelos son:

Conductividad eléctrica (CE). Mide la concentración total de sales en una solución, pero no indica qué sales están presentes. La CE se expresa en dS/m o milimho/cm. Cuando se habla de la CE, debemos siempre especificar si es la CE del agua de riego, la CE del agua de drenaje o la CE de la solución del suelo. En el caso de la CE de la solución del suelo, hay que especificar si es el medido en el extracto de saturación o en relación al estado de humedad del suelo.

Relación de Adsorción de sodio (RAS). El RAS es el valor que expresa la actividad relativa del ion sodio contenido en el extracto de saturación del suelo (pasta preparada con suelo y agua) y en las reacciones de intercambio con éste. Se refiere a la velocidad de adsorción de sodio en relación con los iones calcio y magnesio. Se calcula con la siguiente relación:

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}} \quad (1)$$

Potencial de hidrógeno (pH). El pH tiene un efecto directo en el comportamiento químico del suelo y sobre algunos procesos biológicos que se efectúan en él y es capaz de afectar indirectamente algunas propiedades físicas. Un pH ácido no afecta directamente el desarrollo de los cultivos, sin embargo, favorece la deficiencia de calcio, magnesio, fósforo y potasio en el suelo e incrementa la solubilidad de aluminio y manganeso a niveles que pueden ser tóxicos para la planta (**Tabla 8**).

Porcentaje de sodio intercambiable (PSI, %). El PSI (porcentaje de Sodio intercambiable) se define como la cantidad de Sodio adsorbido por las partículas del



suelo, expresado en porcentaje del CIC (capacidad de intercambio catiónico, determina con la siguiente relación:

$$PSI(\%) = \frac{100 * (-0.0126 + 0.01475 * RAS_{es})}{1 + (-0.0126 + 0.01475 * RAS_{es})} \quad (2)$$

Tabla 8. Clasificación del pH, evaluación y sus efectos esperados.

pH	Evaluación	Efectos esperados en el intervalo
<4.5	Extremadamente ácido	Condiciones muy desfavorables.
4.5 a 5.0	Muy fuertemente ácido	Posible toxicidad por Al ³⁺ y Mn ²⁺ .
5.1 a 5.5	Fuertemente ácido	Exceso: Co, Cu, Fe, Mn y Zn. Toxicidad por Al ³⁺ y Mn ²⁺ . Deficiencia: Ca, K, Mg, Mo, P, S y suelos sin carbonato cálcico. El hormigón ordinario resulta atacado y la actividad bacteriana escasa.
5.6 a 6.0	Medianamente ácido	Intervalo adecuado para la mayoría de los cultivos
6.1 a 6.5	Ligeramente ácido	Máxima disponibilidad de nutrientes
6.6 a 7.3	Neutro	Mínimos efectos tóxicos. Medio óptimo para la mayoría de los cultivos. Por debajo de pH 7.0 el carbonato cálcico no es estable en el suelo.
7.4 a 7.8	Medianamente básico	Suelos generalmente con Carbonato de Calcio.
7.9 a 8.4	Básico	Disminuye a disponibilidad del P y B. Deficiencia creciente de Co, Cu, Fe, Mn, Zn
8.5 a 9.0	Ligeramente alcalino	En suelos con carbonatos, estos pH altos pueden deberse al MgCO ₃ , si no hay sodio intercambiable. Mayores problemas de clorosis férrica.
9.1 a 10.0	Alcalino	Elevado Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI>15%). Presencia de Carbonato Sódico libre. Riesgo de toxicidad por Na ⁺ .
>10.0	Fuertemente alcalino	PSI>15%. Toxicidad: Na y B. Movilidad del P como Na ₃ PO ₄ por lo que puede perderse en procesos de lavado. Actividad microbiana escasa. Micronutrientes poco disponibles, excepto Mo.

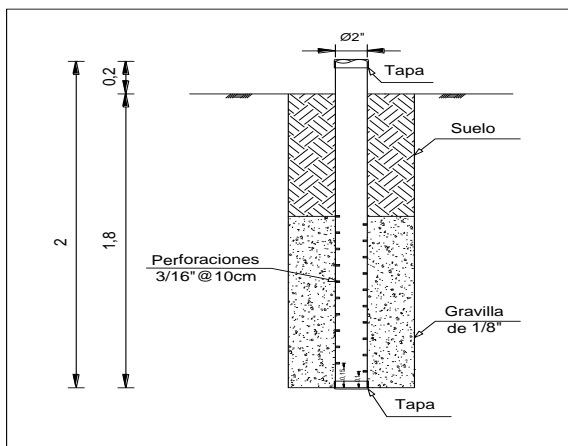
Carbonato sódico residual (CSR). Predice la cantidad de bicarbonato de sodio que quedará en la solución del suelo, después de que se precipitan los carbonatos de calcio y magnesio. La concentración de sodio es suficiente para desplazar el calcio y magnesio del complejo de intercambio produciendo la deflocuación del suelo. Se calcula mediante la siguiente relación:

$$CSR = (CO_3^- + HCO_3^-) - (Ca^{++} + Mg^{++}) \quad (3)$$

Si el $CSR < 1.25$ el agua se considera segura; si el $CSR > 2.5$ el agua no será apropiada para riego.

3.2.2 Instalación de los pozos de observación

Se instalaron 9 baterías de pozos de observación, cada batería consta de 5 pozos; uno se instaló sobre el dren. Considerando el sentido de la corriente del agua, un pozo se coloca al lado izquierdo y el otro al lado derecho del dren separado a 50 cm, el cuarto pozo al centro de la separación entre dos drenes en la margen izquierda y quinto pozo en la margen derecha en sentido de la corriente de agua, y posteriormente se tomaron muestras (**Ilustración 17 a Ilustración 19**).



a)



b)



c)



d)

Ilustración 17. Trabajos de instalación de los pozos de observación de niveles freáticos: a) Esquema de un pozo de observación b) Pluviómetro instalado a 800 m del módulo experimental c) Adecuación de los tubos de PVC como pozos de observación d) Ranurado de los tubos de PVC.



a)



b)



c)

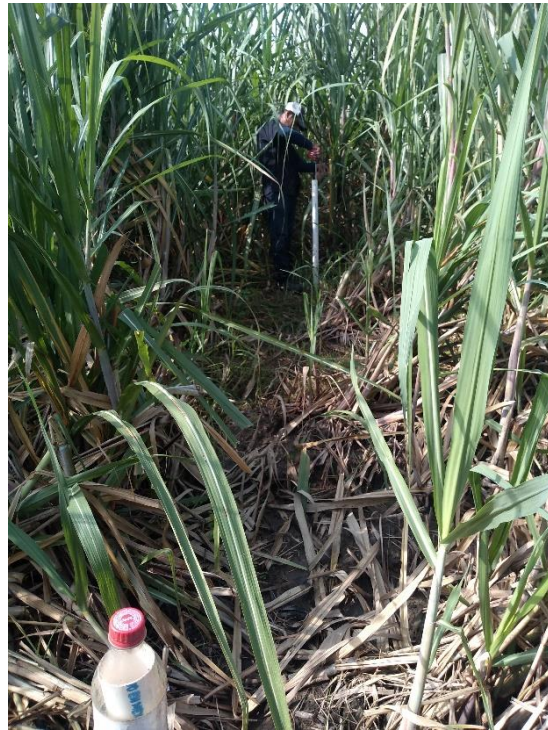


d)

Ilustración 18. Trabajos de instalación de los pozos de observación de niveles freáticos: a) Perforación del pozo de observación hasta 2 m de profundidad b) Instalación y ademado del pozo de observación c) Agua drenada por el sistema de drenaje subterráneo parcelario controlado d) Medición del gasto en un dren colector del sistema de drenaje subterráneo parcelario controlado.



a)



b)

Ilustración 19. Trabajos de instalación de los pozos de observación de niveles freáticos a) Medición de la profundidad del pozo de observación sobre el dren subterráneo b) Medición de la profundidad del nivel freático en el centro de la separación de dos drenes subterráneos.

3.2.3 Medición del gasto en colectores y la profundidad del nivel freático

La medición de la profundidad del manto freático y del gasto en las descargas de los drenes colectores se realizó en forma diaria y horaria. Solo se tuvo dos eventos uno de tres horas y otro de cuatro días.

El comportamiento horario los histogramas presentan solo recesión, esto posiblemente es debido a que el suelo estaba seco y comienza el almacenamiento hasta llegar a la saturación para comenzar a drenar (**Ilustración 20** a la **Ilustración 26**). En cuanto al comportamiento diario en los histogramas en los que se presenta avance y recesión, es debido a que el suelo ya tiene suficiente humedad y comienza a drenar (**Ilustración 27** a la **Ilustración 33**).

Como se indicó anteriormente, el año 2019 fue muy atípico (en Chiapas le llaman año seco), es por eso que no se midieron más eventos y además las lluvias han disminuido en 30% en los últimos 30 años.

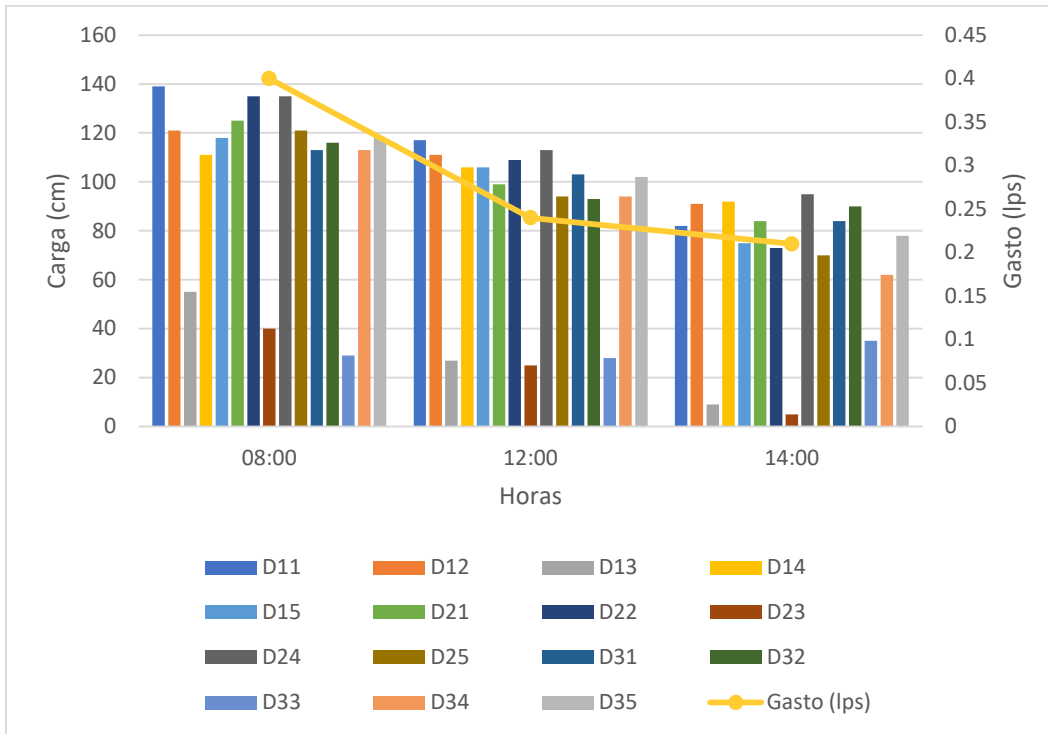


Ilustración 20. Comportamiento del manto freático y gasto en el evento horario.

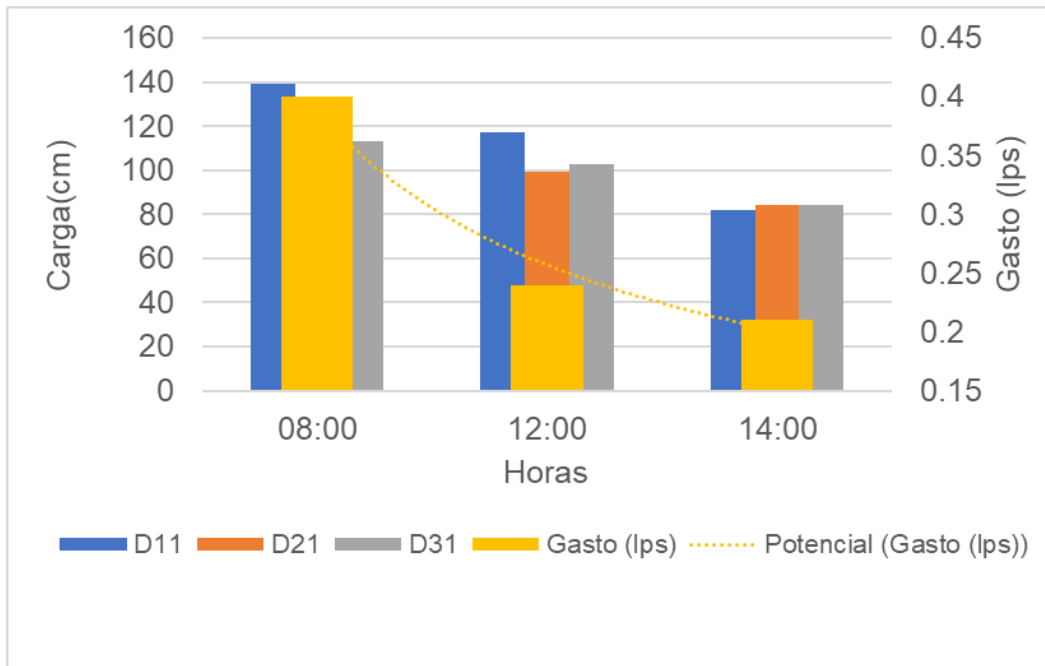


Ilustración 21. Comportamiento del manto freático y descarga de los drenes, Pozos en el centro de los drenes C y D, a lado izquierdo del dren D.

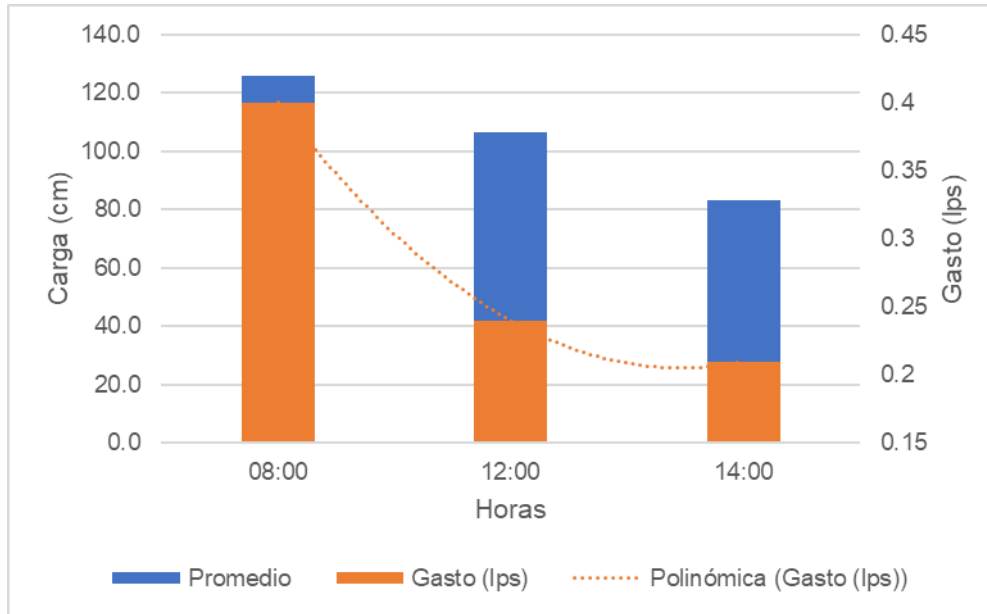


Ilustración 22. Comportamiento del manto freático promedio y descarga de los drenes. Pozos en el centro de los drenes C y D, a lado izquierdo del dren D.

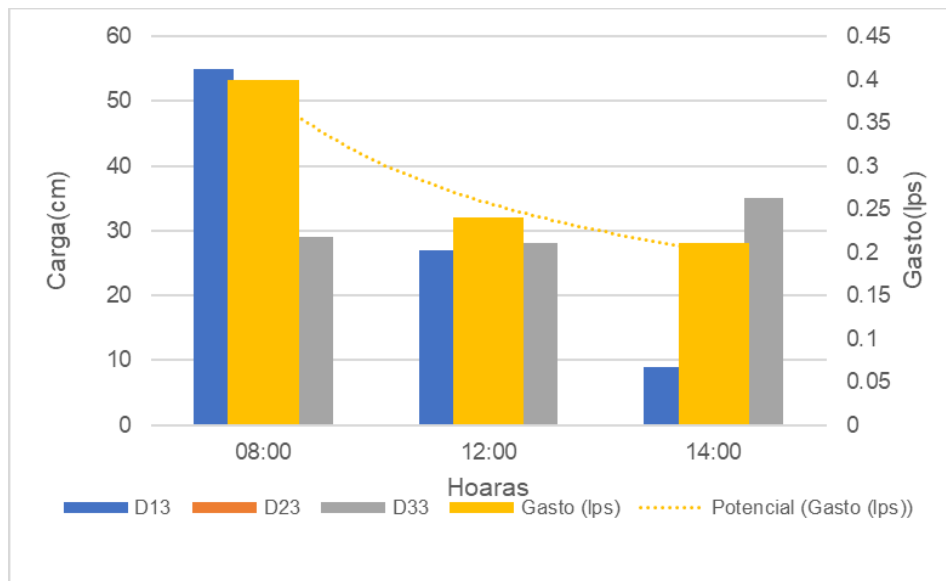


Ilustración 23. Comportamiento del manto freático y descarga de los drenes. Pozos sobre el dren D.

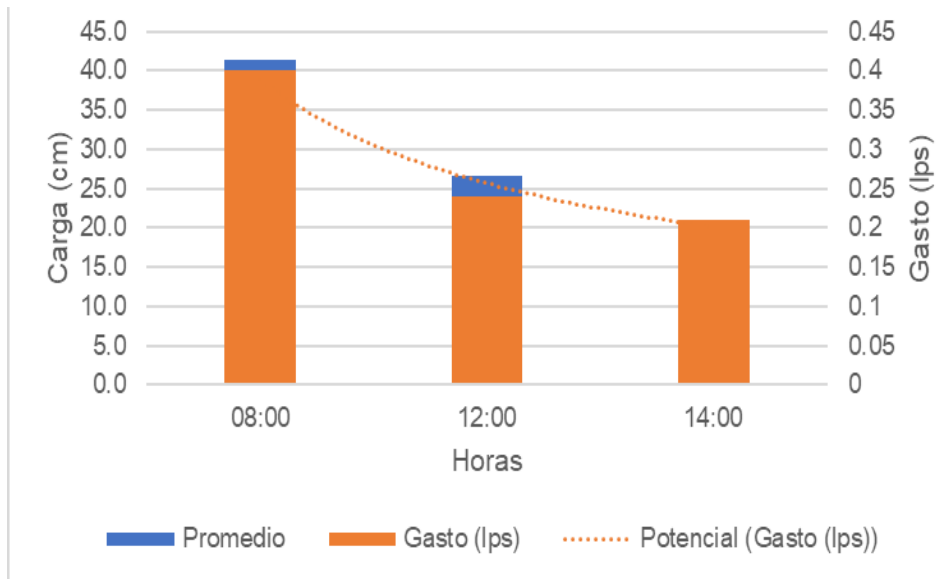


Ilustración 24. Comportamiento del manto freático promedio y descarga de los drenes, Pozos sobre el dren D.

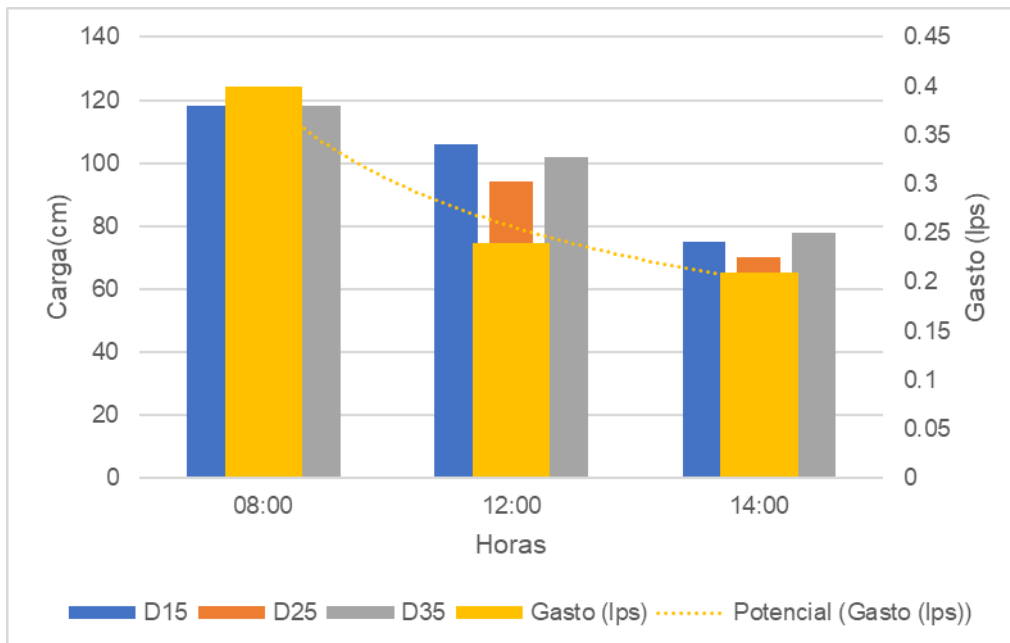


Ilustración 25. Comportamiento del manto freático y descarga de los drenes. Pozos en el centro de los drenes D y E, a lado derecho del dren D.

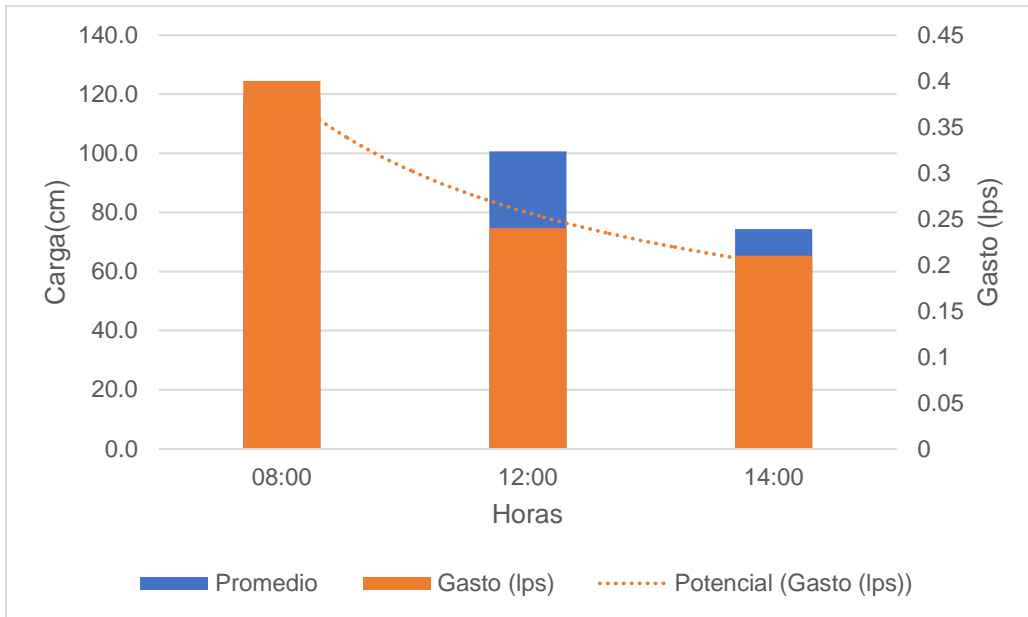


Ilustración 26. Comportamiento del manto freático promedio y descarga de los drenes. Pozos en el centro de los drenes D y E, a lado derecho del dren D.

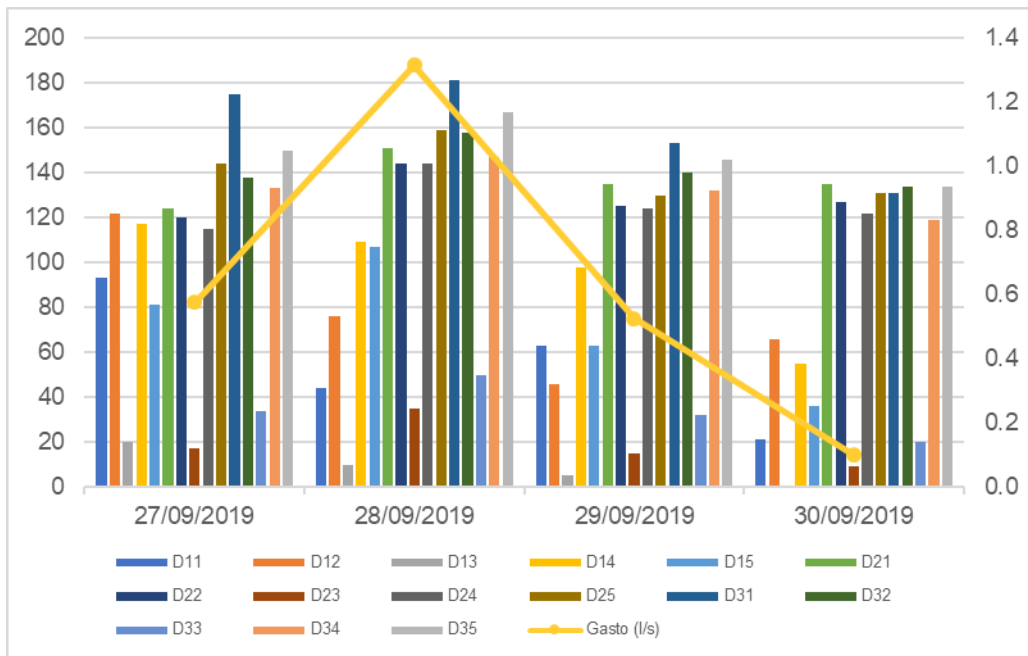


Ilustración 27. Comportamiento del manto freático y gasto en el evento diario.

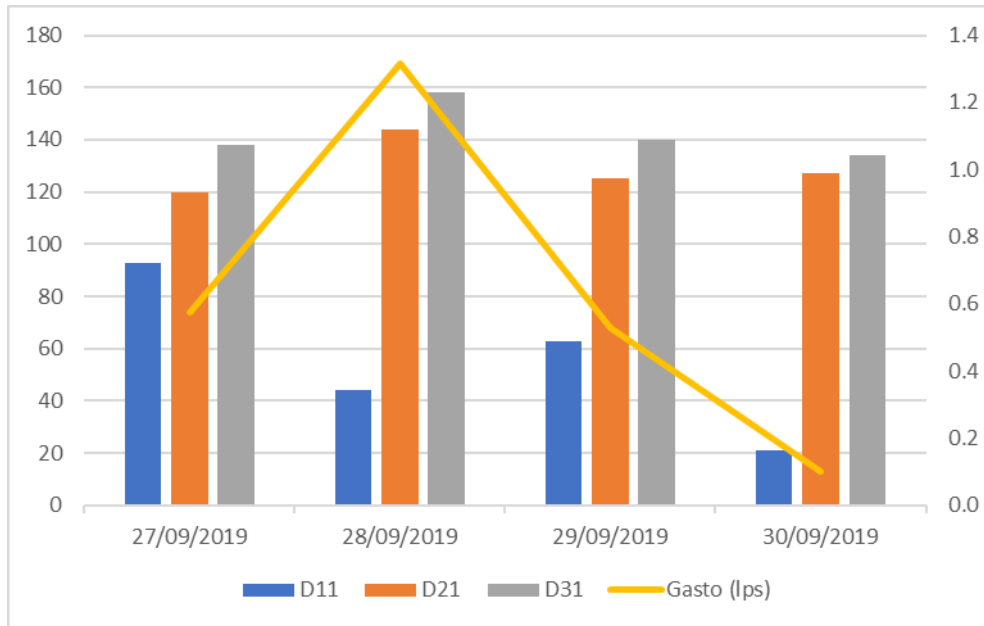


Ilustración 28. Comportamiento del manto freático y descarga de los drenes. Pozos en el centro de los drenes C y D, a lado izquierdo del dren D.

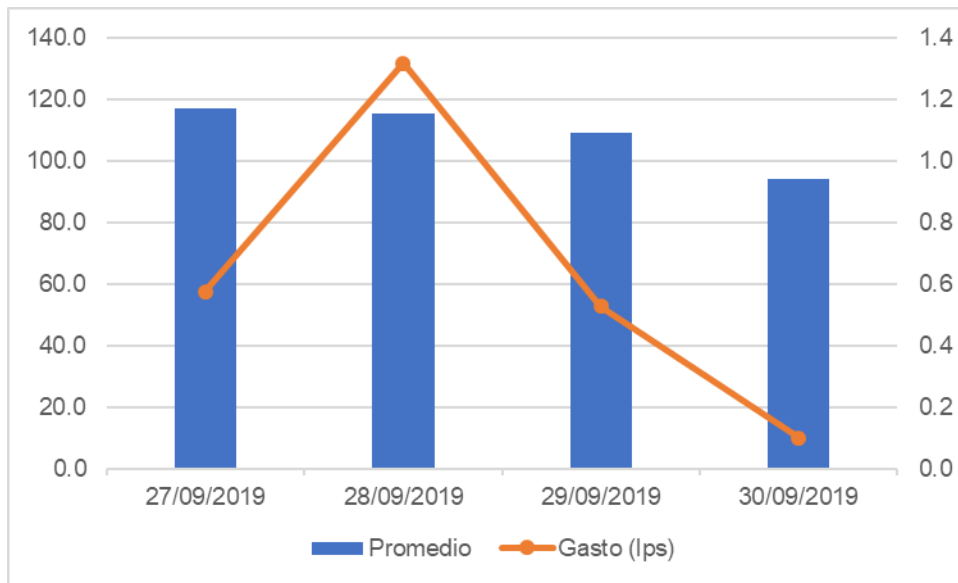


Ilustración 29. Comportamiento del manto freático promedio y descarga de los drenes, Pozos en el centro de los drenes C y D, a lado izquierdo del dren D.

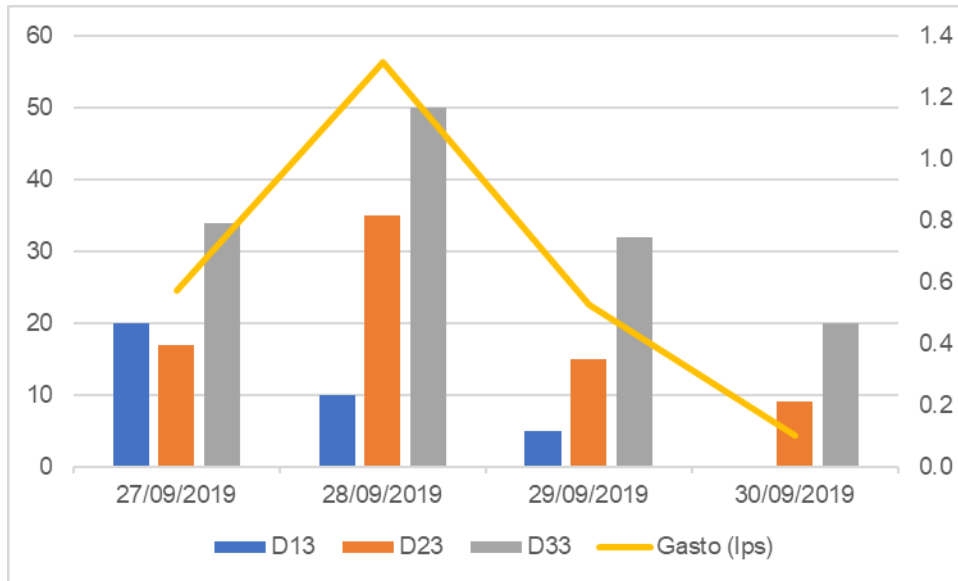


Ilustración 30. Comportamiento del manto freático y descarga de los drenes. Pozos sobre el dren D.

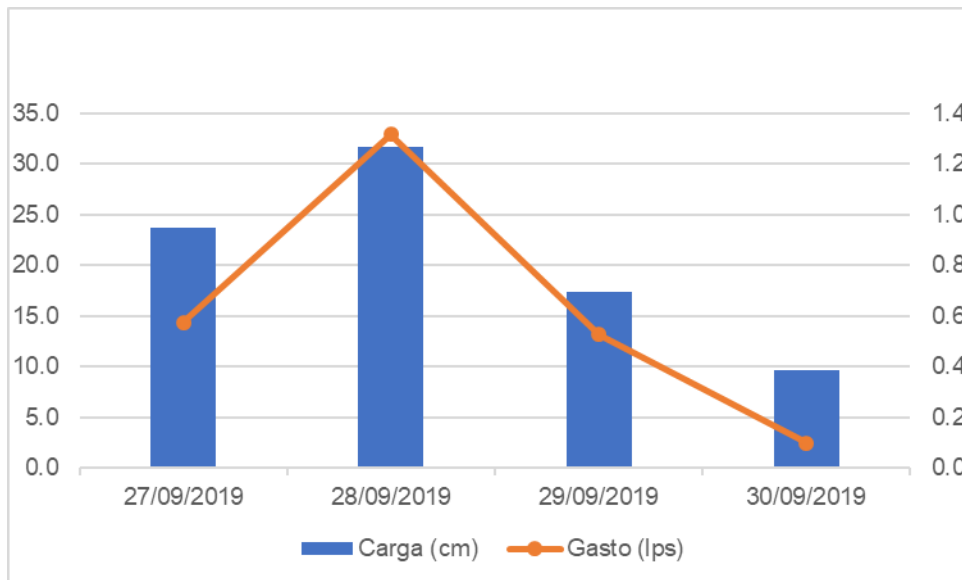


Ilustración 31. Comportamiento del manto freático promedio y descarga de los drenes, Pozos sobre el dren D.

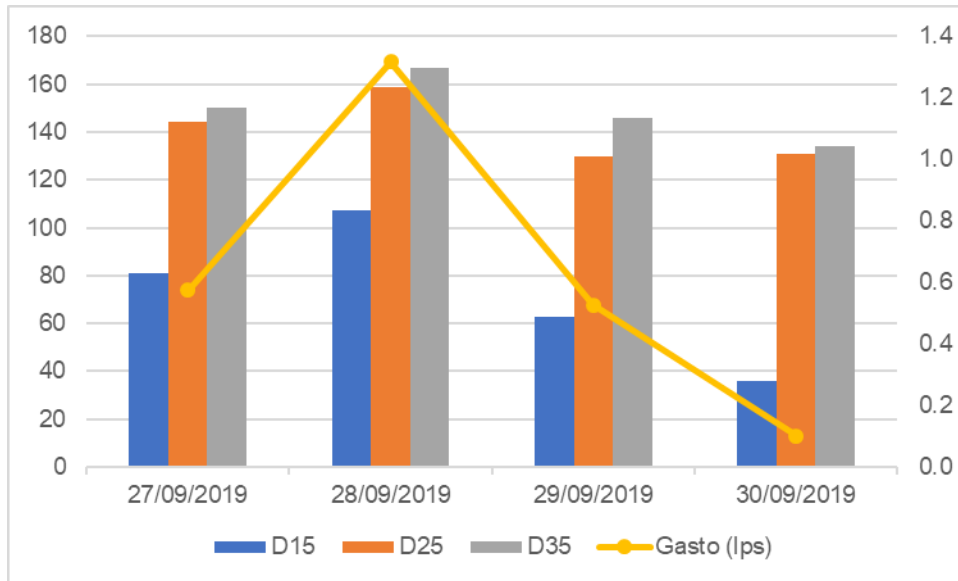


Ilustración 32. Comportamiento del manto freático y descarga de los drenes. Pozos en el centro de los drenes D y E, a lado derecho del dren D.

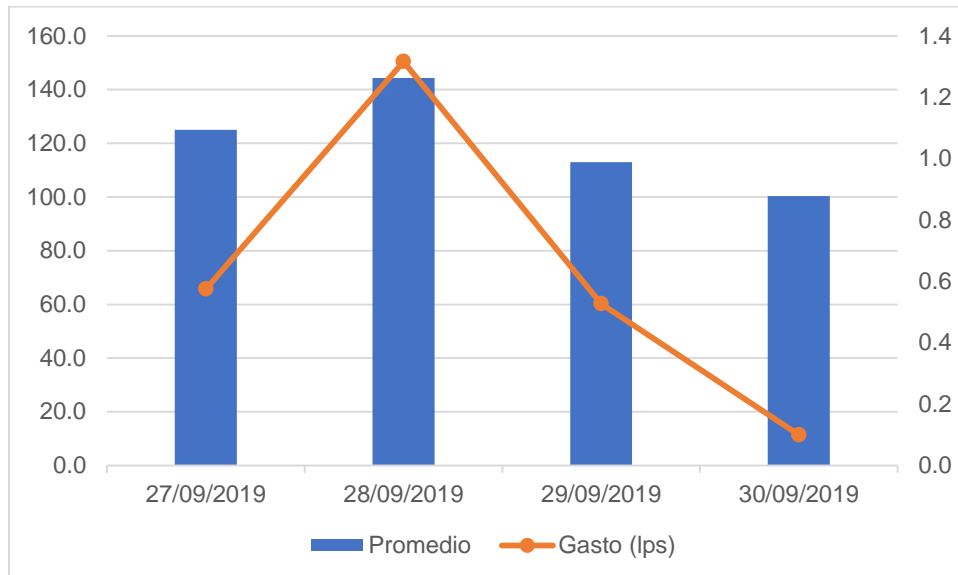


Ilustración 33. Comportamiento del manto freático promedio y descarga de los drenes. Pozos en el centro de los drenes D y E, a lado derecho del dren D.



3.2.4 Habilitación del sistema de drenaje subterráneo parcelario controlado

El sistema de drenaje subterráneo parcelario controlado debe estar en condiciones que su funcionamiento permita realizar una adecuada operación, esto con la finalidad de obtener la información necesaria para los fines y objetivos que se persiguen en este trabajo de investigación tecnológica; por lo tanto, se realizaron los siguientes trabajos (**Ilustración 34 a Ilustración 36**):

Dren 1. Se realizó el mantenimiento mediante el desazolve desde la descarga al dren ingenio hasta 500 m aguas arriba, llegando hasta la pista aérea. Se ha considerado una sección hidráulica que permita evacuar un gasto 4 m^3 y evitar en lo posible inundaciones; además este dren recibe las aguas drenadas por los colectores del sistema de drenaje subterráneo parcelario controlado.

Estructuras de control. Consta de una estructura de materiales sólidos: Ladrillos, cemento, columnas; un vertedor a 60 cm abajo del nivel de la superficie del suelo que permite regular el manto freático y una compuerta. Se rehabilitaron las compuertas cambiando las hojas y el tornillo sinfín, solo servían los bastidores laterales. Se acondicionaron, se armaron nuevamente y se instalaron para que se opere y funcione en la toma de datos.

Colectores parcelarios. Descargan las aguas drenadas de la parcela experimental al dren 1. Cuando se realiza el mantenimiento del Dren 1, los operadores de las máquinas excavadoras no se les da la instrucción para que tuvieran cuidado con la tubería de descarga, ellos realizan el trabajo como si no existiera dichas tuberías, por tanto, prácticamente las destruyen. Se compró cople y tubería de 4" y 8"; se escarbó con pala para encontrar el colector, este se unió con el cople y la tubería, quedando nuevamente operativas para su buen funcionamiento.

Con estas tres acciones realizadas el sistema de drenaje subterráneo parcelario controlado reunía las condiciones para su operación y funcionamiento, permitiendo obtener la información necesaria y cumplir con los objetivos del proyecto.



a)



b)



c)



d)

Ilustración 34. Trabajos para acondicionar el dren para evacuar 4m^3 de agua a) desazolve del Dren 1 en la descarga al dren Ingenio b) desazolve del Dren 1 hasta 70 cm de profundidad c) Desazolve del Dren 1 d) Dren 1 en condiciones para operar y funcionamiento para evacuar 4m^3 .





a)



b)



c)



d)

Ilustración 35. Acondicionamiento de las estructuras de control del Sistema de drenaje subterráneo: a) Corte de los bastidores para sacar la compuerta de la estructura A b) Extracción de la compuerta con el tornillo sinfín de la estructura B c) Estructura A en óptimas condiciones para operar d) Estructura B en óptimas condiciones para operar.



a)



b)



c)



d)

Ilustración 36. Habilitación de los colectores que desfogon el exceso de agua de la parcela con drenaje subterráneo: a) Colector A destrozado, se tendría dificultades para medir el flujo b) Colector D destrozado, no se podría medir el flujo c) Colector A rehabilitado y óptimas condiciones para su buen funcionamiento d) Colector D en proceso de su rehabilitación.



3.2.5 Modelo de simulación de drenaje agrícola

La transferencia de agua en las zonas parcialmente saturada y no saturada del suelo puede abordarse con el uso de modelos de base física para predecir su comportamiento temporal y espacial. En el drenaje agrícola, este fenómeno implica dos escalas de estudio: 1) la escala macroscópica, en la cual se estudia al medio basándose en un volumen elemental representativo; el problema asociado con esta escala se refleja en obtener una solución para la forma tridimensional de la ecuación que describe el movimiento del agua del suelo hacia el dren y además la dificultad asociada con la caracterización hidrodinámica del medio poroso 2) la segunda escala es la megascópica, donde se considera que la velocidad media se obtiene a partir de la aplicación promediada de la ley de Darcy.

Para la evaluación hidráulica del sistema de drenaje se considera la escala megascópica y se utiliza la ecuación de Boussinesq bajo las condiciones de radiación de Newton en la frontera.

En el análisis de un sistema de drenaje subterráneo con tubos paralelos, normalmente se considera suficiente estudiar un corte perpendicular al eje y , como se indica en la **Ilustración 37**. Bajo estas consideraciones, la ecuación de Boussinesq correspondiente es:

$$\mu(H) \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[T(H) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + R \quad (4)$$

donde x es la coordenada espacial horizontal; t es el tiempo; $R = R(x, t)$ el volumen de recarga por unidad de tiempo por unidad de área de acuífero; $H = H(x, t)$ es la carga hidráulica contada a partir de un estrato impermeable; $\mu(H)$ es la capacidad de almacenamiento del acuífero, definida por:

$$\mu(H) = \frac{dW}{dH} = v(H) + (H - H_i) \frac{dv}{dH} \quad (5)$$

$$W(H) = W_i + \int_{H_i}^H \mu(\bar{H}) d\bar{H} \quad (6)$$

$W_i = W(H_i) = 0$ es el volumen de agua almacenada posible de ser drenada o removida por unidad de área denominada *lámina almacenada drenable o removible* y es definida por $dW = d[v(H - H_i)]$, en la cual $v = v(H)$ es una fracción de la porosidad, que



puede ser una función de H , denominada *porosidad drenable*; H_i es la elevación del estrato impermeable.

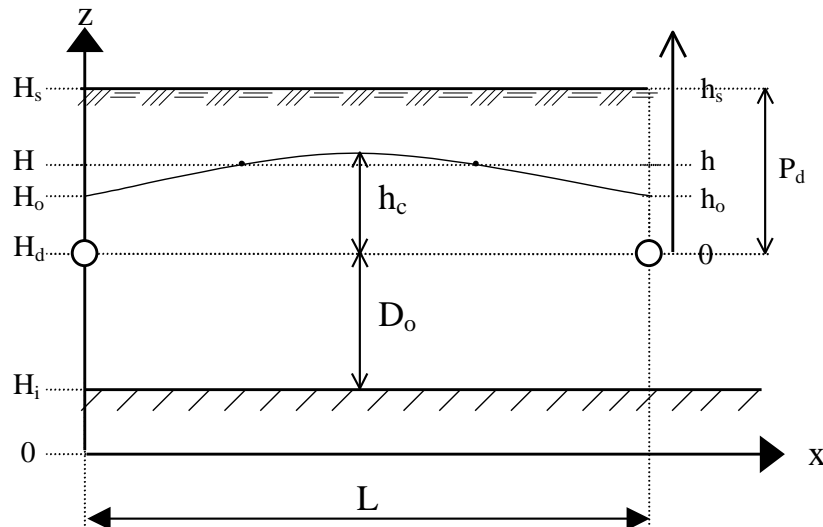


Ilustración 37. Esquema de un drenaje agrícola subterráneo, en el que se indica la distancia entre drenes L ; elevación de la superficie libre H , elevación del estrato impermeable H_i , elevación de los drenes H_d , elevación de la superficie H_s , elevación en el tiempo inicial H_o , éstas a partir de un nivel de referencia denominado “0”. También se señala la distancia entre la elevación del estrato impermeable y la elevación del dren D_o , la profundidad de los drenes a partir de la superficie P_d , además de algunas de las elevaciones ya mencionadas establecidas a partir de la elevación del dren H_d (h_o , h , h_s).

La ecuación (4) resulta de: 1) la ecuación de continuidad: $\mu \partial H / \partial t + \partial Q / \partial x = R$, y de la ley de Darcy que considera los supuestos de Dupuit-Forcheimer: $Q = -T(H) \nabla H$, $T(H) = K_s (H - H_i)$, donde $T(H)$ es la transmisibilidad del acuífero; K_s es la conductividad hidráulica a saturación y Q es el gasto por unidad de longitud de dren. El gasto evacuado por unidad de longitud por un dren (Q_d), resulta del aporte de la mitad de la región interdrenes, es claro que: $Q_d = 2Q$, en $x = 0$ y $x = L$.

La solución más simple de la ecuación (4) se deduce para el régimen permanente ($\partial H / \partial t = 0$), con $K_s = \text{const.}$ o solución de Hooghoudt (1940), en la cual se supone que la recarga es una constante $R = R_o$. La ecuación correspondiente, es clásicamente resuelta para las condiciones: 1) $H = H_o$ en $x = 0$ y $x = L$, y 2) $dH / dx = 0$ en el centro $x = L / 2$, en las cuales L es la separación interdrenes. Es decir:



$$H^2(x) = H_o^2 + \frac{R_o}{K_s} x(L-x) \quad (7)$$

La ecuación (7) es utilizada para el diseño de los sistemas de drenaje parcelarios. Bajo el supuesto de que, en régimen permanente, la recarga es exactamente igual a la descarga (q_o), y haciendo la traslación $H = D_o + h$, en donde D_o es la posición de los drenes contada a partir de la capa impermeable, y h es la carga hidráulica contada a partir de la posición de los drenes, se deduce a partir de (7) lo siguiente:

$$R_o = 4K_s [h_c(h_c + 2D_o) - h_o(h_o + 2D_o)] / L^2 \quad (8)$$

donde h_c es la carga hidráulica correspondiente al centro interdrenes ($x = L/2$). Se ha reemplazado D_o por una profundidad "equivalente" D_e , considerando que no todo el acuífero por abajo de los drenes contribuye a la cantidad de agua evacuada. Van der Molen y Wesselin (1991) deducen una expresión para D_e con el método de las imágenes, para un dren semi-lleño de agua. La ecuación (8) se reduce a la fórmula clásica de Hooghoudt cuando $h_o = 0$.

Para un régimen transitorio la resolución de (4) debe realizarse con condiciones de frontera e iniciales representativas del comportamiento real de un sistema de drenaje. La solución clásica presentada por Dumm (1954), conocida como la solución de Glover-Dumm, se basa en la introducción de una condición de primer orden o de Dirichlet en las fronteras. La solución es obtenida a partir de (4) bajo el supuesto de que la carga hidráulica sobre los drenes es nula. Este supuesto es invalidado por las observaciones obtenidas. En efecto, tanto la carga sobre los drenes, como el gasto a la salida de éstos son funciones del tiempo.

La condición de radiación de Newton, conocida también como condición de Robbins, establece que el flujo de materia por la frontera es proporcional a la diferencia de carga en la vecindad inmediata de esta frontera. Suponiendo que en el interior del dren la presión es igual a la atmosférica (convencionalmente igual a cero), se tiene: $q \propto h$. Haciendo intervenir la conductividad hidráulica a saturación (K_s) y la separación entre drenes (L) el flujo de agua se puede expresar como:

$$q(0,t) = -\gamma K_s h(0,t)/L; \quad q(L,t) = \gamma K_s h(L,t)/L \quad (9)$$

donde γ es un coeficiente adimensional de conductancia de la interfaz suelo-dren. Puesto que de acuerdo con la ley de Darcy $q(x,t) = -K_s \partial h(x,t)/\partial x$, las condiciones en las fronteras se establecen como sigue:



$$-K_s \frac{\partial h}{\partial x} + \gamma \frac{K_s}{L} h = 0, \quad x = 0 \quad (10)$$

$$K_s \frac{\partial h}{\partial x} + \gamma \frac{K_s}{L} h = 0, \quad x = L \quad (11)$$

En un sistema de drenes paralelos a igual separación el gasto de agua que fluye a través de la frontera por unidad de longitud de dren es proporcionado por (Fuentes *et al.*, 1997):

$$Q_i(t) = 2\gamma \frac{K_s}{L} [D_o + h(0,t)] h(0,t) \quad (12)$$

Se reporta la solución de la ecuación (4) (Fuentes *et al.*, 1997) obtenida bajo los supuestos siguientes: i) porosidad drenable constante: $v = \bar{v} \Rightarrow \mu = \bar{\mu} = \bar{v}$, ii) transmisibilidad constante $T = \bar{T} = K_s (D_o + \bar{h})$, iii) recarga nula ($R = 0$), iv) condición inicial constante $H = H_s = D_o + h_s$, v) condiciones de frontera de radiación proporcionadas por las ecuaciones (10) y (11). La solución para $h(x,t)$ es la serie de Fourier siguiente:

$$h(x,t) = h_s \sum_{n=0}^{\infty} A_n \exp\left(-\alpha_n^2 \frac{t}{\tau}\right) \left[\cos\left(\alpha_n \frac{x}{L}\right) + \frac{\gamma}{\alpha_n} \sin\left(\alpha_n \frac{x}{L}\right) \right] \quad (13)$$

donde $\tau = \bar{\mu} L^2 / \bar{T}$.

Los valores propios (α_n) son las raíces positivas de:

$$f(\alpha) = \frac{\alpha}{\gamma} - \frac{\gamma}{\alpha} - 2 \cot(\alpha) = 0 \quad (14)$$

y las amplitudes correspondientes (A_n) se calculan con:

$$A_n = 2 \frac{\alpha_n \sin(\alpha_n) + \gamma [1 - \cos(\alpha_n)]}{\alpha_n^2 + \gamma^2 + 2\gamma} \quad (15)$$

El gasto drenado por unidad de longitud de acuerdo con la ecuación (12) y la lámina drenada son proporcionados respectivamente por:





$$Q_t(t) = \frac{2\gamma\bar{T}}{L} h(0,t) = \frac{2\gamma\bar{T}}{L} h_s \sum_{n=0}^{\infty} A_n \exp\left(-\alpha_n^2 \frac{t}{\tau}\right) \quad (16)$$

$$\ell(t) = \frac{1}{L} \int_0^t Q_t(t) dt = \ell_{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} 2\gamma \frac{A_n}{\alpha_n^2} \left[1 - \exp\left(-\alpha_n^2 \frac{t}{\tau}\right)\right] \quad (17)$$

donde $\ell_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} \ell(t) = \bar{\mu} h_s$.

En razón del límite de la ecuación (17), Fuentes *et al.* (1997) recomiendan tomar como porosidad drenada constante el valor medio siguiente:

$$\bar{\mu} = \frac{1}{h_s} \int_0^{h_s} \mu(h) dh \quad (18)$$

Los mismos autores sugieren tomar, como valor constante de la transmisibilidad el valor medio ponderado siguiente:

$$\bar{T} = K_s (D_o + \bar{h}) = \frac{2}{h_s^2} \int_0^{h_s} hT(h) dh \quad (19)$$

es decir $\bar{h} = \frac{2}{3} h_s$

3.3 Evaluación económica y financiera

Se le denomina producción a la actividad por la cual el hombre se procura nuevos medios para satisfacer sus necesidades, transformando la materia que toma de la naturaleza o poniéndola de cualquier otro modo en condiciones de ser utilizada (Zamora, 1982). Mientras que la productividad es determinada como la relación de producto-insumo de un modo parcial. Así se habla de productividad de la mano de obra, del agua, de la tierra, del fertilizante, etc., y dependiendo del interés de un análisis se determinan indicadores de seguimiento que a través del tiempo reflejan el impacto que determinada acción genera.

Un insumo indispensable en la generación de indicadores, es el establecimiento de controles y la orientación de estrategias es el costo de producción. Para su determinación necesita realizar un análisis de la finca o unidad de producción, que sirva como elemento auxiliar del productor en la elección del cultivo y de la tecnología a utilizar o bien para poder presupuestar y estimar los requerimientos de capital, así como su posible recuperación y la generación de beneficios económicos.





Constituye por ello, el insumo primordial para la determinación del impacto productivo y económico, considerando la participación del productor en su determinación. Se integra por datos aportados por el productor, en relación con la preparación del terreno, siembra o plantación, fertilización, control de malezas, Poda, riego y drenaje, control de plagas y enfermedades, cosecha y asistencia técnica.

En las demás actividades (fertilización, control de malezas, poda, riego y drenaje, control de plagas y enfermedades, cosecha y asistencia técnica, etc.), se sigue el mismo procedimiento: primero la obtención de información de campo y posteriormente su sistematización y determinación de costos.

La determinación de costos de producción, permite inicialmente, calcular la rentabilidad de los cultivos, utilizando para ello expresiones algebraicas basadas en la teoría económica (Krugman y Wells, 2006; Samuelson y Nordhaus, 2009):

$$CT = \sum_1^n (Px * Cx) \tag{20}$$

donde *CT* es el Costo Total de la Producción, *Px* es el Precio unitario del insumo *x* o actividad *x*, *Cx* es la Cantidad de la Actividad *x* o insumo *x*.

Otro elemento importante es la determinación del ingreso total por hectárea, el cual se obtiene de multiplicar el rendimiento del cultivo por su precio de mercado. La expresión algebraica es:

$$IT = Py * Y \tag{21}$$

donde *IT* es el Ingreso Total, *Py* es el precio de Mercado de cultivo (\$*t⁻¹), *Y* es el rendimiento del cultivo (t*ha⁻¹).

De manera conjunta o independiente las actividades que desarrolla la sociedad en forma individual u organizada, lleva consigo un costo implícito, por lo que en ningún caso se omite la obtención de un beneficio por ellas.

Normalmente, los costos en que se incurren o que se requieren, y los beneficios que se obtienen o logran, tienen forma de cuantificarse, y el éxito de una inversión, esfuerzo o intervención se medirá cuando los beneficios sean mayores a los costos.

La medición de éstos puede y debe efectuarse antes y después de realizar la actividad, estableciendo entonces una condición previa a ella y una posterior que permita determinar los beneficios adicionales o generados con el cambio. Se aplica el método comparativo para la determinación de los excedentes generados con la actividad o





conjunto de ellas que buscan propiciar el cambio. En términos económicos, la actividad económica es la acción productiva en la que se utilizan ciertos recursos llamados insumos, con el objeto de transformarlos en bienes o productos finales que generan ingresos o beneficios económicos.

El insumo además de referirse al aplicado directamente a la producción, se refiere al insumo económico necesario para realizar obras de infraestructura y adquisición de equipo y maquinaria, así como acciones no estructurales como asesorías, estudios, capacitación, etc., que influyen en la productividad agropecuaria.

La diferencia entre el valor de los beneficios y el valor de los costos genera el excedente o la utilidad económica del productor o beneficiario de la(s) actividad(es). La generación de ingresos, utilidad o excedente es el objetivo que persigue todo individuo, organización, industria o país al realizar sus actividades.

La determinación a nivel de pronóstico de las posibilidades de obtención de excedentes, es una herramienta para decidir de manera sustentada sobre la posibilidad de invertir o no invertir, para ello la evaluación económica le proporciona indicadores de su potencial para mejorar su utilidad económica y conocer su capacidad financiera.

3.3.1. Criterios económicos, productivos y financieros

Una vez disponibles los valores del costo y el ingreso, se pueden determinar los criterios económicos, productivos y financieros. En matemáticas financieras y análisis de inversiones se pueden utilizar criterios de comparación que permiten una mejor toma de decisiones o una interpretación económica del comportamiento de un aspecto analizado. Los criterios más utilizados son el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y la Razón Beneficio Costo (RBC).

Valor Actual Neto (VAN) o Valor Presente Neto (VPN). Es el valor que actualiza, mediante una tasa de descuento prefijada, el flujo de Beneficios Netos se obtiene de Beneficios Totales (BT) menos los Costos Totales (CT) generados por el proyecto de inversión. La fórmula matemática para obtener el VAN es:

$$VAN = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{(BT - CT)}{(1+i)^t} \tag{22}$$

donde (BT - CT) son los Beneficios Netos Totales (BNT), implicando los gastos directos, indirectos, externalidades e intangibles, t son los valores anuales desde t = 0 hasta t = n, (1 + i)^t es el Factor de Actualización del flujo de Beneficios Netos, i es la tasa sombra del descuento.





Para aprobar un proyecto de inversión desde el punto de vista económico, el VAN debe ser igual o mayor que cero, lo que es equivalente a decir, que dada una tasa de descuento sombra, el valor presente de los beneficios supera al valor presente de los costos.

Criterios de decisión. Se puede obtener tres resultados posibles luego de éste análisis, y por lo tanto se puede llegar a las siguientes conclusiones:

Si el $VAN > 0$, significa que los beneficios netos están por arriba del costo de oportunidad, es decir luego de cubrir con todos los costos en los cuales se incluyen el costo de oportunidad y la inversión, el proyecto genera recursos adicionales y por lo tanto el proyecto es rentable.

Si el $VAN = 0$, implica que el proyecto permite cubrir exactamente todos los costos, erróneamente se suele decir que en este caso el proyecto no gana ni pierde cuando en realidad sucede que los beneficios generados por el proyecto alcanzan tan solo a cubrir los costos de oportunidad de sacrificar otras alternativas de inversión y en consecuencia es indiferente entre realizar el proyecto o escoger otras alternativas de inversión, ya que arrojan el mismo resultado.

Si el $VAN < 0$, quiere decir que los beneficios netos del proyecto no compensan los costos de oportunidad de dejar otras alternativas de inversión que arrojan mejores resultados y por lo tanto el proyecto no vale la pena realizarlo.

Tasa Interna de Retorno Económica. La Tasa Interna de Retorno (*TIR*) económica de un proyecto, es la tasa de descuento que iguala a cero el valor actualizado del flujo de beneficios netos asociados al proyecto. Su obtención se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$TIR = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{(BT - CT)}{(1+i)^t} = 0 \tag{23}$$

La principal ventaja de la *TIR* es que puede ser calculada con los datos del proyecto, y además determina el tiempo en que se llega al equilibrio entre los beneficios y los costos del proyecto. En cuanto a sus limitaciones se citan:

Si en el horizonte del tiempo los beneficios netos cruzan el cero más de una vez, habrá soluciones múltiples para la *TIR*.

Un segundo problema será cuando los proyectos son alternativos entre sí, ya que pueden presentar igual o similar *TIR* pero diferentes *VAN* económicos.





Criterios de decisión. La *TIR* puede ayudar a determinar la rentabilidad del proyecto siguiendo los siguientes criterios:

Si $TIR > i$, el proyecto es viable.

Si $TIR = i$, es indiferente entre invertir en el proyecto o en otras alternativas de inversión.

Si $TIR < i$, no se debe invertir en el proyecto.

Relación Beneficio Costo. Otro importante indicador de la rentabilidad de un proyecto de inversión, es la Relación Beneficio-Costo. No existe un criterio técnico ni conceptual que indique como se debe calcular la *RBC*. Hay dos alternativas de cálculo de la *RBC*:

Como el cociente del valor presente de los beneficios brutos para el valor presente de los costos brutos.

Como el cociente del valor presente de los beneficios netos para el valor presente de los costos netos.

La rentabilidad fue considerada como la relación que existe entre la utilidad y la inversión necesaria para lograrla. Según Gittinger (1989), esta medida de análisis económico fue de las primeras en conocerse ampliamente en Estados Unidos de Norteamérica, aunque ha sido sustituida por el Valor Presente Neto. Su expresión matemática es por lo tanto:

$$RBC = \frac{B}{C} = \frac{\sum_{t=0}^{t=n} \frac{B_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=0}^{t=1} \frac{C_t}{(1+i)^t}} = \frac{\text{Suma de valores actualizados de beneficios}}{\text{Suma de valores actualizados de costos}} \quad (24)$$

donde B_t son los Beneficios en el tiempo, C_t son los Costos en el tiempo, B son los beneficios, C son los Costos, i es la tasa de actualización.

El coeficiente de Beneficio-Costo no es más que otra manera de expresar el valor relativo de los proyectos o de las alternativas a partir de la consideración de sus valores y beneficios actualizados.

El factor de actualización $(1+i)^t$, que se aprecia en el denominador de los elementos de la fórmula de la *RBC*, es la recíproca del factor de interés compuesto o de



acumulación del capital; también es conocido como factor de valor actual. El factor de actualización reduce los valores finales sucesivos a un valor presente equivalente “descontándolos” a una tasa determinada; se conoce también como valor del dinero en el tiempo. El criterio de decisión es el siguiente:

Si $RBC > 1$, se acepta el proyecto.

Si $RBC = 1$, es indiferente entre realizar o rechazar el proyecto, los beneficios netos compensan el costo de oportunidad del dinero.

Si $RBC < 1$, se rechaza el proyecto, el valor presente de los beneficios es menor que el valor presente de los costos.



4. RESULTADOS

4.1 Evaluación Agrohidráulica

La evaluación hidráulica del sistema de drenaje se realiza analizando el comportamiento de las cargas hidráulicas registradas en los pozos de observación y los gastos de drenaje medidos en las descargas.

Se seleccionó como elemento representativo del sistema de drenaje al subsistema compuesto por tres drenes identificados como dren C, D y E (**Ilustración 38**). El dominio de interés tiene 30 m de ancho y 271.9 m de largo, la separación entre drenes es de 15 m y la profundidad media 1.2 m. Las líneas C y D muestran la posición de las baterías de piezómetros utilizadas para la medición de las cargas hidráulicas.

Debido a que el régimen de lluvias durante el verano de 2019 no tuvo las características deseables para la evaluación hidráulica del sistema de drenaje; es decir la lámina de precipitación acumulada durante el periodo en el que se estuvo monitoreando el sistema no fue la suficiente para que los gastos de drenaje conformaran, se seleccionó un evento de precipitación con una lámina acumulada de 113 mm comprendido del 1 al 10 de octubre de 2003 (**Ilustración 39**).

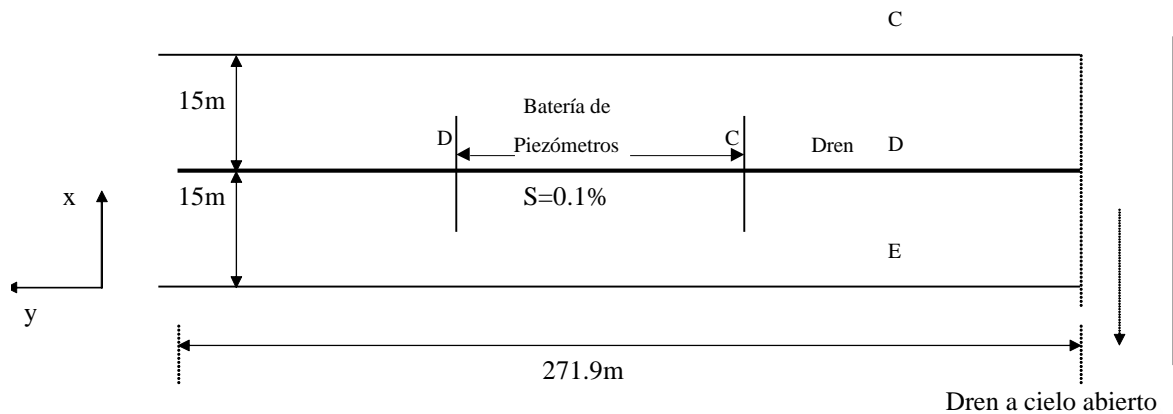


Ilustración 38. Esquema representativo del Sistema de drenaje de la parcela experimental de drenaje

4.1.1 Evaluación hidráulica con base en el modelo de simulación de drenaje

Las características y parámetros del modulo de drenaje experimental de Huixtla son las siguientes: **a)** características del sistema: Separación entre drenes $L = 15 \text{ m}$, Profundidad de los drenes $P_d = 1.2 \text{ m}$, $D_o = 3.8 \text{ m}$ elevación de los drenes, posición del estrato impermeable $H_i = 0 \text{ m}$, elevación de la superficie del suelo $H_s = 5 \text{ m}$; **b)**

propiedades del suelo: contenido de humedad a saturación $\theta_s = 0.475 \text{ m}^3/\text{m}^3$, contenido volumétrico de agua residual $\theta_r = 0.0 \text{ m}^3/\text{m}^3$, la conductividad hidráulica a saturación $K_s = 1.79 \text{ m/d}$, la escala de Bouwer $\lambda_c = 0.20 \text{ m}$, los parámetros de forma $\alpha = \beta = 0.95$; **c)** condición inicial: elevación de la superficie libre $h_s = P_d = 1.2 \text{ m}$; **d)** condición de frontera: $\gamma = 2.0$.

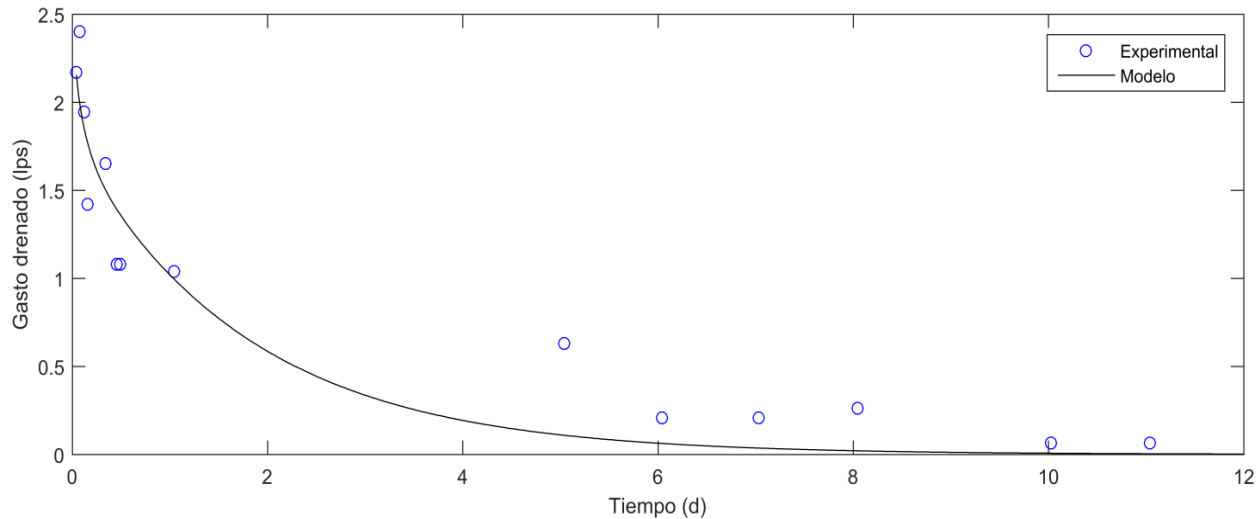


Ilustración 39. Comparación del hidrograma de salida experimental y el hidrograma de salida obtenido con el modelo matemático desarrollado.

El contenido de humedad a saturación θ_s , el contenido volumétrico de agua residual θ_r y el parámetro de forma α se determinaron con base en la textura media considerando un suelo Franco-arcilloso-arenoso; mientras que la escala de Bouwer λ_c , la conductividad hidráulica a saturación K_s y la condición de frontera γ se obtuvieron mediante un método inverso.

En la **Ilustración 39** se presenta la evolución del gasto drenado en el tiempo para los datos experimentales. Como puede observarse el modelo reproduce adecuadamente el hidrograma de salida experimental para del evento seleccionado.

4.2 Evaluación Económica y Financiera

El módulo de drenaje subterráneo parcelario controlado localizado en el Ingenio de Huixtla Chiapas, se construyó en el mes de Agosto de 2003. En la zafra 2004/05, los rendimientos en función de la separación entre drenes de 10, 15 y 20 m; varía de 110, 90 y 130 ton/ha de caña, respectivamente. Si obtenemos el promedio de estos rendimientos nos arroja 110 ton/ha. Es decir, implementando la tecnología de drenaje



subterráneo controlado, se logra incrementar la producción cañera en 63.6%. El Ingeniero Luis Rodolfo Arroyave Moscoso, Gerente agrícola de los ranchos de Fomento Azucarero del Ingenio Huixtla, manifiesta que el promedio actual de rendimiento en las 8,000 ha de caña del Ingenio de Huixtla es de 90 ton/ha. Mientras que en el módulo de drenaje subterráneo parcelario controlado generalmente se obtienen 110 ton/ha. Es decir 20 toneladas más, en comparación con el resto del área donde no se tiene drenaje subterráneo. Los costos de producción se desglosan en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Desglose de costos de producción del cultivo de caña de azúcar

Concepto	Costo	\$/ha	\$/ton
Cosecha	23,284.36	3,842.30	51.70
Gastos indirectos de cosecha	20,555.21	3,391.95	45.64
Otros gastos cosecha	2,729.15	450.35	6.06
Producción	118,249.63	19,513.14	262.56
Atención al cultivo	8,034.51	1,325.83	17.84
Control de malezas	18,230.42	3,008.32	40.48
Control de plagas	520.69	85.92	1.16
Fertilización	15,718.06	2,593.74	34.90
Gastos generales	20,562.98	3,393.23	45.66
Resiembra	1,999.07	329.88	4.44
Riego y drenaje	25,082.04	4,138.95	55.69
Siembra (20% ó 25%)	28,101.86	4,637.27	62.40
Costo total	141,533.99	3,355.44	314.26
Costo de Cosecha	96,289.11	15,889.29	213.89
TOTAL	237,823.10	39,244.74	528.06

Con base en la información del Ing. Arroyave, realizamos la siguiente evaluación económica, para la zafra 2018/2019:

- Separación entre drenes 20 metros.
- Rendimiento promedio en el área cañera: 90 ton/ha en caña
- Rendimiento promedio en el modulo de drenaje subterráneo parcelario controlado: 110 ton/ha en caña.
- Precio de la tonelada de caña: \$741.00
- Precio de del Sistema de drenaje subterráneo parcelario controlado \$42,000.00, considerando la tubería, accesorios, estructura de control e instalación del Sistema.
- Interés o tasa de descuento 12%

La **Tabla 10** muestra que la tecnología del drenaje subterráneo parcelario probada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, en Huixtla , Chiapas, es altamente



redituable, debido a que la inversión se recupera en el Segundo año agrícola. La Relación Beneficio Costo es de 2.1, éste valor es mayor de 1, por lo tanto, se acepta el Proyecto; la Tasa Interna de Retorno es de 97%, valor mayor del 12%, que es la tasa de descuento o interés.

Tabla 10. Evaluación económica del Sistema de drenaje subterráneo parcelario controlado

			VPN	TIR	B/C	REC. INV.		
ALTERNATIVAS ECONOMICAS			(AÑO)					
TASA DE DESCUENTO:	0.12							
FACTOR INCR. EN COSTOS	1.00		110,357	97	2.1	2		
FACTOR INCR. EN BENEF.:	1.00							
ANALISIS DE LA INFORMACION								
No.	COSTOS	BENEF.	FEN	VPN	VPC	VPB	RELACION	AÑO DE
PERIODO	(\$)	(\$)		Flujo de efectivo			B/C	RECUP.
0	42,000.00	0.00	-42000	42,000	42,000	-	0.0	42,000
1	39,244.74	81,510.00	42265	37,737	35,040	72,777	2.1	4,263
2	39,244.74	81,510.00	42265	33,694	31,286	64,979	2.1	29,430
3	39,244.74	81,510.00	42265	30,084	27,934	58,017	2.1	59,514
4	39,244.74	81,510.00	42265	26,860	24,941	51,801	2.1	86,374
5	39,244.74	81,510.00	42265	23,982	22,269	46,251	2.1	110,357
			VPN:	110,357	183,468	293,825	2.1	
			TIR:	97				

La **Tabla 11** refleja la capacidad real del proyecto y muestra que al segundo año se cubre la inversión requerida. Todos los valores fueron actualizados al 12%, es decir puede tener un costo del dinero en el tiempo por esa tasa.

Tabla 11. Tasa de amortización (VPN) del Sistema de drenaje parcelario controlado.

Años	Costo	Beneficio	Capacidad de pago	saldo	Pagos	Saldo
0	42,000	-	42,000	42,000	-	
1	35,040	72,777	37,737	4,263	37,737	4,263
2	31,286	64,979	33,694	29,430	4,263	-
3	27,934	58,017	30,084	59,514		
4	24,941	51,801	26,860	86,374		
5	22,269	46,251	23,982	110,357		

La capacidad promedio de pago anual es de \$30,471/ha, aunque, con la finalidad de que el sistema de drenaje proporcione beneficios para la satisfacción de las



necesidades básicas como el alimento, vestido, educación entre otros, se calcularon pagos anualizados de \$8,400, que amortizarían el costo del Sistema de drenaje, lo que le proporcionaría al productor que adopte la tecnología, un beneficio medio de \$22,071.36/ha. Los \$8,400.00 es la cantidad de lo que recibiría por 10 ton/caña, que a partir del segundo año se estaría beneficiando el productor con la instalación del sistema de drenaje (**Tabla 12**). Sin embargo es conveniente aclarar que para que éste análisis económico dé los resultados esperados, es condición que se aplique el paquete tecnológico al cultivo de caña en los tiempos y cantidades de insumos requeridos.

Tabla 12. Tasa de amortización (VPN) en pesos constantes.

Año	Costo	Beneficio	Capacidad de pago	Pagos	Compromiso de pago anual	Beneficio saldo anual
0	42,000	-	42,000	-	42,000	
1	35,040	72,777	37,737	8,400	33,600	29,337
2	31,286	64,979	33,694	8,400	25,200	25,294
3	27,934	58,017	30,084	8,400	16,800	21,684
4	24,941	51,801	26,860	8,400	8,400	18,460
5	22,269	46,251	23,982	8,400	-	15,582
		PROMEDIO	30,471.36			22,071.36





5. CONCLUSIONES

Para la región de Huixtla, Chiapas, en la cual se ubicó el módulo demostrativo se reúnen los requisitos climáticos y edáficos básicos, para el buen desarrollo del cultivo de caña de azúcar. Sin embargo, la limitante edáfica encontrada, es aquella derivada del drenaje interno del suelo, que es deficiente, lo cual afecta el contenido final de sacarosa en la caña, por lo que se recomienda la instalación de sistemas de drenaje controlado para evacuar el exceso de agua del perfil del suelo en las fases finales del ciclo vegetativo, con lo que se propiciará el incremento en la producción de sacarosa, lo que representará un mejor ingreso para los productores de la zona.

Por otra parte, mediante el desarrollo de un modelo de simulación de un sistema de drenaje agrícola se logró describir el funcionamiento hidráulico del mismo comparando el hidrograma de salida experimental y el obtenido con el modelo matemático desarrollado, los cuales corresponden adecuadamente. Este modelo permite evaluar diferentes escenarios de precipitación o en su caso de riego.

La tecnología del drenaje subterráneo parcelario probada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, en Huixtla, Chiapas, resultó altamente redituable, debido a que el análisis económico financiero indicó que la inversión se recupera en el segundo año agrícola, donde la Relación Beneficio Costo obtenida fue de 2.1 y la Tasa Interna de retorno del 97 %.





BIBLIOGRAFÍA

CONAGUA. 2011. Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Temporal Tecnificado. Año Agrícola 2010. Ed. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Subdirección general de infraestructura hidroagrícola. Gerencia de Distritos de Temporal Tecnificado. 110 pp. México, D.F. 2011.

CONAGUA. 2019. Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Temporal Tecnificado. Año Agrícola 2017. Ed. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Subdirección general de infraestructura hidroagrícola. Gerencia de infraestructura de protección en ríos y distritos de temporal tecnificado. 144 pp. Cd. de México.

Fauconier, R. y Bassereau, D. 1980. El cultivo de la caña de azúcar. Ed. Científico técnico. La Habana Cuba.

INEGI. 1988. Carta Topográfica Huixtla. Escala 1:50 000. Ed. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

FIRA, Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. 2010. Producción sostenible de caña de azúcar en México. En: Boletín informativo Nueva época No. 11.

INEGI. 2015. Anuario Estadístico y Geográfico de Chiapas. Ed. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática - Gobierno del Estado de Chiapas. México.

SAGARPA-CONADESUCA. 2015. Ficha técnica del cultivo de caña de azúcar. Ed. Comité Nacional para el desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. 19 pp.

SGM, Servicio Geológico Mexicano. 2006. Proyecto de estudios de peligros naturales en Municipios de la Plancie costera del Estado de Chiapas. Atlas de Peligros de la ciudad y municipios de Huixtla, Chiapas. Subdirección de Geología. Ed. Servicio Geológico Mexicano-Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)-Secretaria de Seguridad Pública-Subsecretaría de Protección Civil. 127 pp. Pachuca, Hidalgo.

Fuentes, C., Namuche, R., Rendón, L., Patrón, R., Palacios, O., Brambila, F. y González, A. 1997. Solución de la ecuación de Boussinesq del régimen transitorio en el drenaje agrícola bajo condiciones de radiación: el caso del Valle del Carrizo, Sinaloa. Hermosillo, México: VII Congreso Nacional de Irrigación.

Hooghoudt, S. B. 1940. Bijdragen tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond: Algemeene beschouwing van het probleem van de detailontwatering en de infiltratie door middel van parallel loopende drains, greppels, slooten en kanalen (No. 46, 14 B). Algemeene Landsdrukkerij.





Krugman Paul y Robin Wells. 2006. Introducción a la Economía, microeconomía. Reverte, Barcelona España. 537 p.

Samuelson, P. A. y W. D. Nordhaus. 2009. Economía, 19ª Edición, McGraw-Hill, Madrid, España. 744 p.

Van der Molen, W. H. y Wesseling, J. (1991). A solution in closed form and a series solution to replace the tables for the thickness of the equivalent layer in Hooghoudt's drain spacing formula. Agricultural Water Management, 19(1), 1-16.

Zamora. F. 1982. Tratado de teoría económica. Fondo de Cultura Económica. 18ª ed. México.

