



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

ANÁLISIS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL Y PROPUESTA DE DRENAJE SUBTERRÁNEO EN “LA CERONA”

TESIS DE GRADO:

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

PRESENTA:

ÁNGEL HERNÁNDEZ FACUNDO

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:

JORGE VÍCTOR PRADO HERNÁNDEZ, PhD.



DIRECCIÓN DE ACADÉMIA
SECTOR DE SERVICIOS ESCOLARES
CALLE DEL COMERCIO S/N, CHAPINGO, MEX.

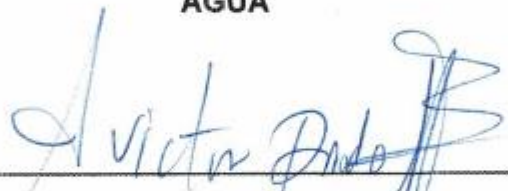



CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO, DICIEMBRE DE 2020


ANÁLISIS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL Y PROPUESTA DE
DRENAJE SUBTERRÁNEO EN "LA CERONA"

Tesis realizada por **Ángel Hernández Facundo** bajo la supervisión del comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL
AGUA

DIRECTOR: 
Dr. Jorge Víctor Prado Hernández

ASESOR: 
Dr. Mauricio Carrillo García

ASESOR: 
Dr. Agustín Ruíz García

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
DEDICATORIAS.....	viii
AGRADECIMIENTOS.....	ix
DATOS BIOGRÁFICOS.....	x
RESUMEN GENERAL.....	xi
ABSTRACT	xii
1 INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Literatura citada	3
2 REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 El agua en el suelo	5
2.2 El drenaje agrícola.....	10
2.3 Deterioro del crecimiento de los cultivos.....	13
2.4 Espaciamiento entre drenes usando la ecuación de Glover-Dumm	15
2.5 Evaluación de modelos matemáticos.....	18
3 Diagnóstico de Drenaje en “La Cerona”	23
3.1 Resumen	23
3.2 Abstract	24
3.3 Introducción	24
3.4 Materiales y métodos.....	26
3.4.1 Descripción del área de estudio	26
3.4.2 Freatimetría.....	26
3.4.3 Topografía.....	27
3.4.4 Caracterización del suelo	28
3.5 Resultados y discusión	30
3.6 Conclusiones	37
3.7 Agradecimientos	38
3.8 Literatura citada	38
4 Evaluación de modelos matemáticos para el cálculo de la separación de drenes subterráneos parcelarios.....	42
4.1 Resumen	42
4.2 Abstract	43

4.3	Introducción	44
4.4	Materiales y métodos.....	46
4.4.1	Localización	46
4.4.2	Suelo.....	47
4.4.3	Modelo físico	49
4.4.4	Conductividad hidráulica	52
4.4.5	Modelo matemático	53
4.5	Resultados y discusión	54
4.6	Conclusiones	59
5	Propuesta de drenaje	64
6	NEXOS	75

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Profundidad de NF después de precipitación	16
Cuadro 2. Tiempo acumulado en el descenso del NF	17
Cuadro 3. Coordenadas de referencia para el levantamiento topográfico.	30
Cuadro 4. Coordenadas de Pozos de Observación	30
Cuadro 5. Características Perfil (a).....	32
Cuadro 6. Características Perfil (b).....	33
Cuadro 7. Características de los suelos en el modelo.	55
Cuadro 8. Datos estadísticos entre lo observado y lo calculado con Glover-Dumm.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Bloque de un paisaje con los respectivos componentes de la escorrentía.....	5
Figura 2. La succión frente versus curvas de contenido de agua en la absorción.	8
Figura 3. Parábola de Dupuit y su comparación con la línea superior de flujo, en una presa de tierra con taludes verticales y tirante h_2 aguas abajo.	9
Figura 4. Zonas de drenaje en el mundo.	11
Figura 5. Esquema general de drenaje subterráneo.	15
Figura 6. Ubicación de pozos de observación.....	26
Figura 7. Construcción de pozos de observación	27
Figura 8. Puntos de arranque para el levantamiento topográfico	28
Figura 9. Levantamiento topográfico.....	28
Figura 10. Perfiles pedológicos.....	29
Figura 11. Determinación de conductividad hidráulica.	29
Figura 12. Plano topográfico.....	31
Figura 13. Elevaciones del cauce Río Chapingo.....	31
Figura 14. Secciones transversales del Río Chapingo.....	32
Figura 15. Mínimas elevaciones del Nivel Freático.	33
Figura 16. Planos de Isobatas	35
Figura 17. Planos de Isohipsas.....	36
Figura 18. Profundidad del Nivel Freático-Área-Tiempo	37
Figura 19. Localización de perfiles pedológicos.....	47
Figura 20. Perfil pedológico junto a PO 01.....	47
Figura 21. Excavación hasta el estrato cuatro.	48
Figura 22. Estructura del modelo físico.....	49
Figura 23. Instalación de Pozos de Observación y piezómetros	50
Figura 24. Compactación de suelo	50
Figura 25. Ubicación de drenes, pozos de observación y piezómetros	51
Figura 26. Características del tubo de drenaje, acotaciones en mm.....	51

Figura 27. Suelo saturado.....	52
Figura 28. Pozos para medir la conductividad hidráulica	52
Figura 29. Descenso del agua en el estrato cuatro.....	54
Figura 30. Descenso el agua en el estrato cinco.	54
Figura 31. Profundidad del perfil de agua en la primera hora con observaciones registradas a cada 5 minutos.....	55
Figura 32. Profundidades del perfil de agua en la segunda hora con observaciones registradas a cada 5 minutos.	56
Figura 33. Profundidades del perfil de agua en la tercera y cuarta hora, con observaciones a cada 10 y 30 minutos respectivamente.	56
Figura 34. Perfiles de agua observados.....	56
Figura 35. Volumen de agua acumulado del dren 1 y 2 en el modelo.	57
Figura 36. Profundidades del perfil de agua en los tiempos 1, 2, 3, 4, 7, 10, 14 y 17 horas después de abrir los drenes.....	58
Figura 37. Diseño de drenaje "La Cerona".....	65
Figura 38. Comportamiento de Nivel freático en cada riego.....	74

DEDICATORIAS

A mi hijo Luis Ángel

A mis padres Rosendo Hernández y Martina Facundo.

A mis hermanos: Melia, Meche, Choo, Selma, Cari, Pascual, Petry, Filo, Ceci y sobre todo a mi hermana Mari.

A mis amigos y compañeros de maestría: Edgar Merino, Raúl Vidal, Guillermo, Alberto, Natalia, Juan José, Víctor e Isaías

A mis amigos: Heriberto, Raúl, Roberto, Juan Gabriel, Gamaliel y Pablito

A alguien admirable: Erica Tereira

y en general a todas esas personas con las que he compartido un momento de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico brindado para desarrollar mis estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, por la oportunidad brinda para la realización de mis estudios de posgrado.

Al Dr. Jorge Víctor Prado Hernández, por su apoyo y su valioso tiempo para guiarme en la realización de este trabajo, toda mi admiración por ser un excelente investigador. Así mismo al Dr. Mauricio Carrillo García y al Dr. Agustín Ruíz García.

A mi familia, por su apoyo incondicional y porque son mi motivación.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: Ángel Hernández Facundo

Fecha de nacimiento: 01 de octubre de 1990

Lugar de nacimiento: Pajapan, Veracruz

No. de Cartilla militar: D-5706725

CURP: HEFA901001HVZRCN06

Profesión: Ingeniero en Irrigación

Cédula profesional: 11401076

Desarrollo Académico

Bachillerato: Preparatoria Agrícola Chapingo, generación 2006-2009

Licenciatura: Ingeniería en Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, generación 2009-2013

RESUMEN GENERAL

ANÁLISIS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL Y PROPUESTA DE DRENAJE SUBTERRÁNEO EN “LA CERONA”

La presencia de nivel freático subsuperficial en áreas agrícolas afecta el desarrollo de los cultivos; para proponer una solución acertada a este problema es necesario elaborar una serie de estudios que permitan determinar la magnitud y origen del problema, para ello se instalaron 22 pozos de observación en el campo experimental “La Cerona” de la Universidad Autónoma Chapingo y se midió la profundidad del Nivel Freático de manera semanal en un periodo de diez meses. Se comparó el ascenso del Nivel Freático con las fechas de riego y con las elevaciones de la superficie libre del agua de los ríos adyacentes. Resultó que las pérdidas por infiltración y percolación profunda debido al riego recargan de manera inmediata el Nivel Freático, los ríos no funcionan como drenaje natural y por lo tanto existe una afectación grave en un 30% del predio. Como alternativa de solución al problema existente se propone el diseño de un sistema de drenaje subterráneo, sin embargo, para seleccionar el modelo matemático más preciso en el cálculo de la separación de drenes subterráneos, se desarrolló un modelo físico que representa este fenómeno en el laboratorio y se comparó el comportamiento del perfil de agua observado contra el perfil calculado de acuerdo con las ecuaciones de Glover-Dumm y Kraijenhoff para régimen transitorio. Se utilizó suelo del estrato 4 y 5 del predio “La Cerona”, con densidades 1.22 g cm^{-3} y 1.46 g cm^{-3} respectivamente. El perfil de suelo fue saturado y se midió la variación de la carga hidráulica sobre los drenes en nueve piezómetros, así como, el volumen de salida durante 17 horas de dos drenes paralelos de 1.2 cm de diámetro, separados a 1.4 metros y pendiente de 1%. Los resultados muestran que la ecuación matemática más precisa es Glover-Dumm y la separación de drenes para el cultivo de maíz es de 21.5 m.

Palabras clave: Flujo subsuperficial, Drenaje subterráneo, Nivel Freático, Modelo físico, Perfil de agua.

Tesis de Maestría en Ingeniería, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Hernández Facundo Ángel

Director de Tesis: Prado Hernández J. Víctor

ABSTRACT

SUBSURFACE FLOW ANALYSIS AND PROPOSAL FOR SUBWAY DRAINAGE AT "LA CERONA"

A solution to the problem of subsurface water table in agricultural areas is proposed as it affects crop development. In order to find an appropriate solution to this problem, it is necessary to carry out a series of studies to determine the magnitude and origin of the problem. To this end 22 observation wells were installed in the experimental field "La Cerona" at the Universidad Autónoma Chapingo and the depth of the water table was measured weekly for 10 months. Subsequently, the rise in the water table was compared with the dates of irrigation and elevations of the free water surface of adjacent rivers. It turned out that the infiltration losses and deep percolation due to irrigation immediately recharge the water table. The rivers do not function as natural drainage and therefore there is a serious effect on 30% of the property. As an alternative, the design of an underground drainage system is proposed. To select the most accurate mathematical model in the calculation of the separation of underground drains, a physical model representing this phenomenon was developed in the laboratory and the behavior of the observed water profile was compared with the profile calculated according to the Glover-Dumm and Kraijenhoff equations for a transitory regime. Soil from the 4th and 5th stratum of "La Cerona" property was used, with densities of 1.22 g cm⁻³ and 1.46 g cm⁻³ respectively. The soil profile was saturated and the variation of the hydraulic load on the drains was measured in nine piezometers, as well as the output volume during 17 hours of two parallel drains of 1.2 cm in diameter, separated at 1.4 meters and 1% slope. The results show that the most precise mathematical equation is Glover-Dumm and the drain separation for corn crop is 21.5 m.

Keywords: Subsurface flow, Underground drainage, Freatic level, Physical model, Water profile.

Engineering Master Thesis, Postgraduate in Agricultural Engineering and Integrated Water Use, Autonomous University Chapingo.

Author: Hernández Facundo Ángel

Thesis Advisor: Prado Hernández J. Víctor

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

Las áreas cultivables disminuyen debido a la salinización del suelo, erosión y urbanización. Es necesario aumentar sustancialmente la producción de cultivos en las áreas húmedas, además se requiere de la agricultura de riego para proveer grandes proporciones de alimento en las regiones áridas y húmedas. El drenaje subterráneo brinda beneficios que son necesarios para satisfacer estos cambios en áreas húmedas y áridas (Ayars & Evans, 2015).

La superficie potencial de riego en función de la aptitud de la tierra en México es de 13.5 millones de ha, esta superficie se reduce a 9.8 millones de ha si se toma en cuenta la disponibilidad de agua. La mayor parte de las tierras subutilizadas se localizan en el trópico húmedo, en donde se construyeron 18 Distritos de Temporal Tecnificado (DTT) para el aprovechamiento de 7.5 millones de ha agrícolas con infraestructura hidráulica destinada a la evacuación del agua en exceso (FAO, 2014).

La Comisión Internacional de Riego y Drenaje (ICID) en su base de datos de zona drenada del mundo registra para México 27.5 millones de hectáreas de tierras arables y cultivos permanentes de las cuales solo el 18.9% cuenta con drenes, estos datos tienen como año de referencia 1997 (ICID, 2018). Aunque, el diseño y la gestión de los sistemas de riego han evolucionado enormemente en las últimas décadas, la metodología de diseño y los criterios de gestión del drenaje subterráneo no han cambiado en los últimos 50 años. Por lo tanto, todos los aspectos del drenaje agrícola requieren una seria reconsideración y reevaluación para poder satisfacer las nuevas necesidades de drenaje (Ayars & Evans, 2015).

En un lote experimental perteneciente a la Universidad Autónoma Chapingo, personal de campo ha observado en diversos ciclos agrícolas el anegamiento parcial en un área de este predio, dificultando las labores de cultivo, así como la disminución en la producción. Como medida de solución se construyó un pequeño canal para desalojar el agua superficial almacenada. Debido a que el problema no fue solucionado, en algunas ocasiones se ha evitado cultivar esta

área. Por otro lado, también se ha identificado que predios cercanos cuentan con niveles freáticos superficiales. Por este motivo, se piensa que el anegamiento en esta área se debe a una deficiencia de drenaje natural ocasionado por el un nivel freático somero.

El efecto de un nivel freático cercano a las raíces de los cultivos tiene efectos negativos tanto en el desarrollo como en la producción (Zambrano et al., 2003; Jiménez et al., 2010; Muñoz Ruiz & León Quirós, 2016), así como, en la dificultad para realizar labores de cultivo (Ortega Corrales, 1996). Otro efecto provocado por el nivel freático es la salinización del suelo (Mercado Fernández et al., 2011; Coras Merino et al., 2014).

El presente trabajo tiene como objetivo el análisis de flujo subsuperficial en el predio “La Cerona”, con la finalidad de determinar la magnitud y origen del problema de anegamiento. Con base al diagnóstico y las características físicas del suelo se propone el diseño de drenaje subterráneo, sin embargo, de acuerdo a Ritzema, citado Darzi-Naftchally, Majid Miriatifi, y Asgari (2014) los dos tipos básicos de ecuaciones empleadas para determinar el espaciamiento de drenaje parcelario son: de estado permanente y de estado transitorio. En áreas irrigadas o con precipitaciones muy variables, las suposiciones para régimen permanente no se cumplen y las ecuaciones del estado transitorio son a veces más apropiadas. Para cuantificar la precisión del modelo matemático de estado transitorio utilizado en la separación de drenes agrícolas subterráneos se desarrolla un modelo físico en la cual se mide la variación del perfil de agua abatido por dos drenes subterráneos.

La presente investigación está conformada por cinco capítulos: El primero comprende la introducción general, en la cual se describe la importancia del tema, los antecedentes y los objetivos del estudio.

El capítulo dos presenta una revisión de literatura, aquí se aborda sobre la importancia del drenaje en la agricultura, algunos conceptos de movimiento de agua en el suelo debido a que estos son de suma importancia en el cálculo de la separación de drenes subterráneos y se finaliza con la explicación del modelo

matemático de Glover-Dumm y las últimas experimentaciones respecto a este modelo.

El capítulo tres se refiere a un artículo científico sobre el diagnóstico de drenaje en el predio “La Cerona”, aquí se presenta la metodología para identificar la magnitud y el origen del nivel freático elevado en este predio, además se presentan las variables requeridas en el cálculo de la separación de drenes subterráneos como una alternativa de solución.

En el capítulo cuatro se presenta un artículo científico sobre un experimento en el laboratorio en donde se mide el perfil de agua abatido por dos drenes agrícolas subterráneos y se compara con el abatimiento predicho por el modelo matemático de Glover-Dumm.

En el capítulo cinco se presenta un diseño de drenaje agrícola subterráneo como una alternativa de solución real al problema encontrado en el predio “La Cerona”.

1.1 Literatura citada

Ayars, J. E., & Evans, R. G. (2015). Subsurface Drainage - What's Next? *Irrigation and Drainage*, 64(3), 378–392. <https://doi.org/10.1002/ird.1893>

Coras Merino, P. M., Ontiveros Capurata, R., & Diakite Diakite, L. (2014). Movimiento del agua freática y concentración de sales en suelos agrícolas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(4), 537–548. <https://doi.org/10.29312/remexca.v5i4.917>

Darzi-Naftchally, A., Majid Miriatifi, S., & Asgari, A. (2014). Comparison of steady- and unsteady-state drainage equations for determination of subsurface drain spacing in paddy fields : a case study in Northern Iran. *Paddy Water Environ*, 12, 103–111. <https://doi.org/10.1007/s10333-013-0364-4>

FAO. (2014). *Perfil de país-México* (pp. 1–23). <https://doi.org/10.1787/9789264222052-4-es>

- ICID. INTERNATIONAL COMMISSION ON IRRIGATION AND DRAINAGE, (2018). ICID DATABASE, World drained areas: <https://www.icid.org/world-drained-area.pdf>
- Jiménez, J. de la C., Moreno, L. P., & Magnitskiy, S. (2012). Respuesta de las plantas a estres por inundacion. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 6(1), 96–109.
- Mercado Fernández, T., Ortega Escobar, M., Arenas Tawil, A., & Combatt Caballero, E. (2011). Dinámica de sales en el distrito de riego La Doctrina, Colombia. *Idesia (Chile)*, 29(1), 83–90. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292011000100011>
- Muñoz Ruiz, C., & León Quirós, J. (2016). El rol del nivel freático en el rendimiento del banano (*Musa AAA*) clon gran enano. *Tecnología En Marcha*, 15(3), 18–24.
- Ortega Corrales, L. J. (1996). *Diagnostico y consecuencias del mal drenaje en el sur de Chile. Proyecto: Estudio de Investigación y Validación de Tecnología de Drenaje en las IX-X-XI Regiones.*
- Zambrano, F., Villafaña, R., & Figueroa, R. (2003). Efecto De La Profundidad Del Nivel Freático Sobre La Producción De Tomate En Un Suelo Franco Arenoso Y Bajo Condiciones De Invernadero. *Agronomía Tropical*, 53(4), 22–31.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El agua en el suelo

Koorevaar et al. (1983) menciona que el material natural que cubre la superficie terrestre es el suelo, y que es el producto de la erosión mecánica, química y biológica, además está compuesta por material mineral, materia orgánica, solución hídrica y aire en el suelo.

De acuerdo con Hanks & Ashcroft (1980) las partículas sólidas con diferentes tamaños y formas componen el “esqueleto” del suelo, donde hay poros interconectados de diferente tamaño y forma; mencionan que pueden existir poros llenos de aire en un suelo seco y poros con agua en un suelo completamente saturado.

Morgan (2005) explica que cuando ocurre una tormenta, el agua puede caer directamente sobre la superficie, a lo cual se le llama caída directa, y otra parte de la lluvia es interceptada por la vegetación, de la cual puede regresar a la atmósfera mediante la evaporación o escurrir hasta el suelo; una vez que la lluvia llega al suelo, esta puede almacenarse en depresiones o infiltrarse en el suelo; y una vez que el suelo ya no puede absorber más agua, el exceso contribuye al escurrimiento superficial (Figura 1).

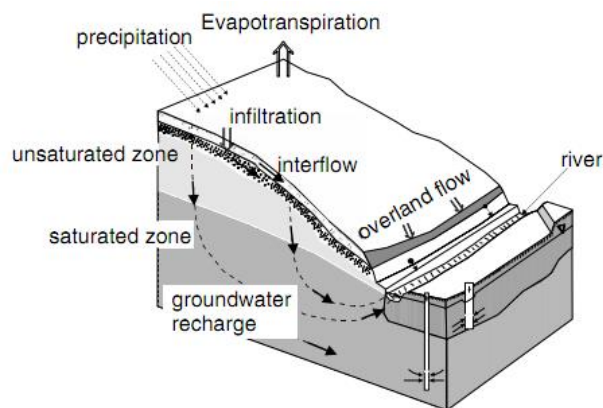


Figura 1. Bloque de un paisaje con los respectivos componentes de la escorrentía.
Nota: Tomada de Grounwater recharge from run-off, infiltration and percolation (p. 78), Seiler y Gat (2007), The Netherlands: Springer.

Para Seiler & Gat (2007) la infiltración describe el proceso de cómo las dimensiones y almacenamiento insaturado se ven influidas por la entrada del agua en la litosfera; y la percolación es el flujo de agua en la zona no saturada, y a que diferencia del flujo subterráneo, esta puede ir en cualquier dirección, ya que es impulsada por la gravedad y por los gradientes capilares.

Las moléculas de agua, de acuerdo con Foth (1990), son fuertemente polares debido a que las cargas eléctricas están distribuidas asimétricamente y como las partículas de tierra tienen sitios eléctricamente negativos como positivos, la tracción entre moléculas de agua y las superficies de las partículas de suelo propician fuerzas adhesivas muy fuertes.

El contenido de agua en el suelo, comúnmente, se define como el agua que puede ser evaporada al calentarse entre 100 y 110 °C hasta que no se pierda peso (Smith & Mullins, 2000).

De acuerdo con Smith & Mullins (2000), el potencial total del agua en el suelo se divide en tres componentes:

$$\psi_t = \psi_m + \psi_g + \psi_o \quad (1)$$

Donde ψ_m se refiere al potencial mátrico, ψ_g como potencial gravitacional y ψ_o como potencial osmótico. El potencial mátrico se define como *“la cantidad de trabajo útil que debe realizarse por unidad de cantidad de agua pura para transferir de manera reversible e isotérmica al agua del suelo una infinitesimal cantidad de agua de una piscina a presión atmosférica estándar que contiene una solución de composición idéntica a la del agua del suelo y se encuentra a la altura del punto considerado”* (Marshall et al., 1996).

En este mismo sentido, de acuerdo con Kirkham (2005) el potencial gravitacional es la que se asocia con la posición vertical, y el potencial osmótico es la porción del potencial hídrico que se le atribuye a la atracción de solutos por el agua.

Rattan & Manoj (2004) mencionan que la presión osmótica expresa el decremento de la energía potencial del agua en una solución con respecto a la del agua pura.

(Breemen & Buurman, 2003) mencionan que, para entender el comportamiento del agua en los poros del suelo, hay que tomar en cuenta dos características de suma relevancia: primero la relación que hay entre la presión potencial y el contenido de la humedad volumétrica y segundo la relación entre la presión potencial y la conductividad hidráulica.

El movimiento del agua en el suelo, el cual es generalmente bajo y de flujo laminar vertical, puede ser descrito por la Ley de Darcy (Breemen & Buurman, 2003)

$$q = -k * gradH \quad (2)$$

Donde q es la velocidad de flujo ($m s^{-1}$), K es la conductividad hidráulica (ms^{-1}) y gradH es el gradiente en la carga hidráulica ($m m^{-1}$)

Los factores que determinan la conductividad hidráulica pueden ser el porcentaje de arcilla, la cantidad de agregados estables en el agua, la naturaleza de los cationes intercambiables, la concentración de sales disueltas, el contenido de materia orgánica, humedad, carga hidráulica, entre otros (Dregne, 2019).

(Kirkham, 2005) relaciona tres términos con el balance hídrico, y los explica de la siguiente manera:

Capacidad de campo. Es el contenido de agua (en porcentaje) que queda constante después de un riego o una lluvia, después de uno o dos días.

Punto de marchitez. También se le conoce punto de marchitez permanente. Es la cantidad de agua por unidad de peso o por unidad de volumen de suelo (en porcentaje) que es tan presionada por la matriz del suelo que las raíces de una planta no pueden absorber.

Agua disponible. Es la diferencia entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

Hillel (1998) menciona que el potencial mátrico y humedad del suelo se pueden obtener de dos maneras:

- 1) Se puede comenzar con una muestra saturada, a la cual se le aplicará una succión en aumento, para secar gradualmente el suelo, tomando mediciones de la humedad frente a la succión.
- 2) Mojando gradualmente una muestra de suelo, la cual inicialmente estará seca, mientras la succión es reducida de manera incremental.

A partir de lo anterior se obtienen dos curvas continuas, las cuales no son idénticas. El equilibrio de la humedad del suelo en una succión es mayor en la desorción que en la absorción; y hasta dependencia entre el contenido y estado de equilibrio del agua en el suelo de la dirección del proceso es conocido como histéresis.

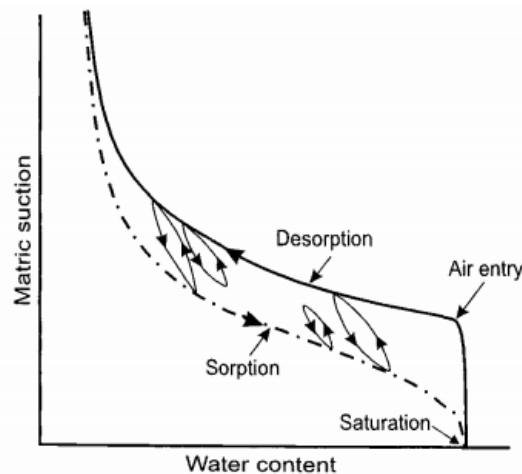


Figura 2. La succión frente versus curvas de contenido de agua en la absorción.
Nota: Tomada de Hillel, D. (1998). Environmental Soil Physics. In Environmental Soil Physics.

Por otro lado, se dice que un medio es homogéneo con respecto a una determinada propiedad si esa propiedad es independiente de la posición dentro del medio. En caso contrario, se dice que el medio es heterogéneo. Se dice que un medio es isotrópico con respecto a una determinada propiedad si esa propiedad es independiente de la dirección dentro del medio. Si en un punto del medio una propiedad del medio, por ejemplo, la permeabilidad o la conductividad térmica, varía con la dirección, se dice que el medio es anisotrópico (o aleotrópico) en el punto considerado con respecto a esa propiedad (Flores, 2000).

Flores también hace una demostración de la derivación original de Dupuit, y realiza las siguientes suposiciones referentes al movimiento del agua

- a) En cada punto de una línea vertical el gradiente hidráulico es constante.
- b) Este gradiente es igual a la pendiente dy/dx de la línea superior de corriente en el punto donde la interseca la línea vertical.

Esta última suposición representa una buena aproximación del gradiente hidráulico promedio en una línea vertical, siempre y cuando la pendiente de la línea superior de corriente sea relativamente plana.

Por lo tanto, se tiene:

$$i = dy/dx$$

$$q = k i A = k y dy/dx \quad (1)$$

$$\text{Ya que } A = y * 1$$

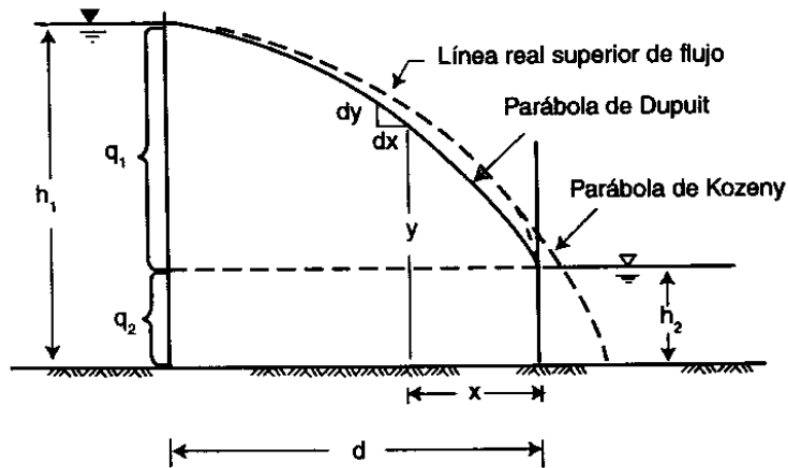


Figura 3. Parábola de Dupuit y su comparación con la línea superior de flujo, en una presa de tierra con taludes verticales y tirante h_2 aguas abajo.

Nota: Tomada de Flores, R. (2000). Flujo de agua a través de suelos (4th ed.).

Arreglando la ecuación 3 e integrando se tendrá:

$$\int \left(\frac{q}{k} \right) dx = \int y dy$$

O sea:

$$\left(\frac{q}{k}\right)x = \frac{y^2}{2} + C \quad (2)$$

Para $x=d$ y $y=h_1$, de la ecuación 4 se obtiene:

$$C = \left(\frac{q}{k}\right)d - (h_1)^2 \quad (3)$$

Llevando la ecuación 4 a la 5 se obtiene:

$$\frac{q}{k}(d - x) = \frac{h_1^2 - y^2}{2} \quad (4)$$

Esta última parábola representa la parábola de Dupuit

Para $x=0$ y $y=h_2$, la ecuación anterior se convierte en:

$$\frac{q}{k}(d - x) = \frac{h_1^2 - h_2^2}{2} \quad (5)$$

Y despejando se obtiene:

$$q = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2d} \quad (6)$$

Esta expresión se conoce como la fórmula de Dupuit, la cual utiliza Glover-Dumm para formular su modelo matemático.

2.2 El drenaje agrícola

Las condiciones de drenaje agrícola en todo el mundo pueden agruparse a grandes rasgos en tres zonas; la zona templada, la zona húmeda/semi-húmeda y la zona árida/semi-árida.

a) Zona templada

La mayor parte de los activos de drenaje del mundo se encuentran en los países desarrollados de la zona templada, especialmente en Europa y en América del Norte. El desarrollo del drenaje en estas regiones comenzó en serio a principios

del siglo XIX y en la mayoría de los países entre el 20 y el 35% de las tierras agrícolas han recibido alguna forma de drenaje mejorado. Este porcentaje parece estar cerca de la saturación, ya que las tierras restantes parecen estar lo suficientemente bien drenadas de forma natural para adaptarse al uso actual de la tierra o, de otro modo, no se justifica la inversión en drenaje. Esto explica, junto con las preocupaciones ambientales imperantes, el estancamiento del desarrollo del drenaje en esta zona.

El drenaje ha contribuido en gran medida al desarrollo agrícola de esta zona, tanto horizontalmente (ampliando la superficie agrícola) como verticalmente (aumentando la producción por hectárea). Gran parte de las tierras anteriormente anegadas se han convertido en tierras agrícolas altamente productivas. La mejora del drenaje también ha ayudado a crear las condiciones propicias suelo, agua y aire para producir cultivos de alto rendimiento y alto valor a bajo costo.

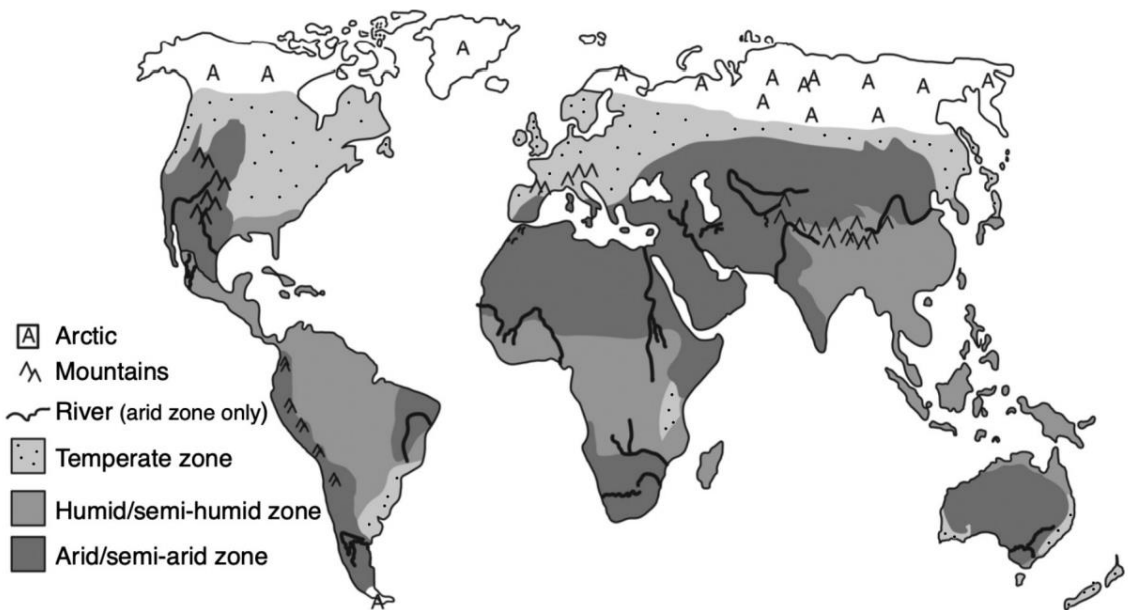


Figura 4. Zonas de drenaje en el mundo.

Nota: Vlotman, W. F., Smedema, L. K., & Rycroft, D. W. (2013). Modern Land Drainage Planning, Design and Management of Agricultural Drainage Systems

b) Zona árida y semi-árida

La principal necesidad de drenaje de la tierra es el control del anegamiento y la salinización en los 100-120 millones de hectáreas de tierras de regadío (de un total mundial de 270 millones de hectáreas) situadas en esta zona. No existen datos fiables sobre la magnitud del problema, pero los datos disponibles sugieren que unos 20-30 millones de ha de esta tierra ya están gravemente afectadas y que están creciendo en unos 0.25-0.50 millones de ha por año.

La mayor parte de las tierras de regadío de esta zona tienen algún tipo de drenaje superficial, que suele consistir en una combinación de drenajes naturales existentes anteriormente y unos pocos drenajes construidos adicionalmente. Las densidades de drenaje rara vez superan los 2-5 m por ha (espaciamiento medio de 2 a 5 km), lo que deja gran parte de la tierra sin una salida de drenaje cercana. Además, los desagües existentes a menudo no funcionan correctamente debido a un mantenimiento inadecuado y a los bloqueos del flujo por cruces de infraestructura y otras obstrucciones causadas por el hombre. El drenaje de superficie en las explotaciones agrícolas se basa generalmente en el flujo migratorio no estructurado de parcela a parcela y suele ser sumamente inadecuado.

No todas las tierras necesitan un mejor drenaje del subsuelo, ya que el drenaje natural puede bastar para proporcionar suficiente lixiviación y mantener los niveles freáticos a un nivel bajo seguro. El control de los niveles freáticos tampoco suele ser un problema en las zonas donde hay aguas subterráneas dulces, ya que el bombeo continuo de los pozos tubulares para el riego suele proporcionar un drenaje más que suficiente. Los problemas de anegamiento y salinización se limitan en su mayor parte a las zonas de aguas subterráneas salinas y a las zonas subyacentes de sustratos poco permeables, que son menos adecuadas para el desarrollo de los pozos tubulares. Para estas zonas, el drenaje por tubería suele ser la mejor solución. Se estima que la superficie ya provista de este tipo de drenaje es del orden de 2.5 millones de hectáreas, a las que se añaden cada año unas 100,000 a 200,000 hectáreas. Evidentemente, considerando las

estimaciones anteriores de la zona anegada/salinizada, esto cubre sólo una fracción de las necesidades.

c) Zona húmeda y semi-húmeda

El desarrollo agrícola de esta zona, tanto de las tierras de secano como de las de regadío, se ve gravemente limitado por las inundaciones y el anegamiento causados por las elevadas precipitaciones del monzón. Afecta especialmente a las extensas llanuras de las tierras bajas. Una característica típica de estas llanuras es que el uso de la tierra se adapta a los regímenes hidrológicos imperantes y que las oportunidades de cultivar variedades mejoradas de arroz y cultivos de alto valor no relacionados con el arroz son muy limitadas. Las inundaciones y el anegamiento también limitan la introducción de la mecanización y de otras técnicas agrícolas modernas. Un mejor control de las inundaciones y el drenaje de las tierras aumentaría estas oportunidades. Sin embargo, el drenaje tendría que hacerse por etapas, ya que el control total del exceso de agua sería técnicamente difícil de lograr y bastante costoso. El reto del drenaje para esta zona es definir los próximos pasos factibles, teniendo en cuenta las limitaciones económicas y técnicas.

Las necesidades de desarrollo del drenaje de esta zona son fácilmente del orden de 100-200 millones de hectáreas, mientras que la población beneficiaria puede muy bien superar la marca de los 500 millones. Se trata esencialmente de una nueva frontera del drenaje, ya que los conocimientos y la tecnología en materia de drenaje de las demás zonas tienen una importancia limitada. La mayoría de los países de esta zona carecen de capacidad técnica y necesitan urgentemente fortalecer sus marcos de creación de capacidad.

2.3 Deterioro del crecimiento de los cultivos

Los cultivos más comunes son las plantas mesofíticas 1, que crecen mejor cuando hay suficiente agua y aire en la zona de la raíz. Respiran por intercambio gaseoso en la zona de la raíz, el proceso por el cual las raíces absorben el oxígeno (O₂) de la atmósfera del suelo y liberan dióxido de carbono (CO₂) de nuevo en ella. Las raíces también son capaces de absorber el O₂ disuelto en el

agua del suelo, pero esta capacidad es muy limitada. El arroz es inusual en ser capaz de transferir el oxígeno tomado a través de las estomas internamente a las raíces y por lo tanto es capaz de crecer bien, aunque sus raíces estén sumergidas.

En los suelos anegados, el contenido de aire del suelo es bajo porque la mayoría de los poros están llenos de agua. Además, el intercambio entre el aire que queda en el suelo y el aire de la atmósfera superior (O_2 que entra en el suelo, CO_2 que sale) está muy restringido en estas condiciones. En consecuencia, la respiración se ve restringida por la deficiencia de oxígeno mientras que al mismo tiempo el dióxido de carbono se acumula a niveles tóxicos, perjudicando directamente el crecimiento de las raíces y la capacidad de éstas para absorber los nutrientes. Las condiciones anaeróbicas del suelo también pueden dar lugar a la formación de concentraciones tóxicas de compuestos reducidos de hierro y manganeso, sulfuros y gases orgánicos.

La aireación de la zona radicular generalmente se vuelve inadecuada cuando el volumen efectivo de los poros llenos de aire en la zona radicular principal cae por debajo del 5-10%. Sin embargo, la duración del anegamiento y su momento en relación con la actividad y la etapa de desarrollo del cultivo también son importantes. El anegamiento de toda la zona de las raíces durante un período de dos o tres días puede ser fatal cuando ocurre durante la etapa de germinación, mientras que un cultivo bien desarrollado probablemente sufrirá relativamente pocos daños por un incidente similar. Además, un cultivo sano que crece vigorosamente es capaz de soportar mejor el anegamiento que uno pobre. La mayoría de los cultivos tienen una gran proporción de sus raíces en la capa superior del suelo, por lo que la restauración temprana de la capa superior del suelo aireada es de particular importancia.

Los cultivos sufren mucho más por el anegamiento en condiciones de clima cálido que en condiciones de clima frío. Esto se debe a que las plantas son fisiológicamente más activas a temperaturas más altas, lo que aumenta el consumo de oxígeno (de los cultivos, pero también de la flora y fauna del suelo)

y provoca déficits anteriores. La menor solubilidad del oxígeno en el agua a temperaturas más altas también juega un papel importante.

En los climas templados, los suelos anegados suelen permanecer fríos durante demasiado tiempo en la primavera para el buen crecimiento de los cultivos. El anegamiento también afecta al crecimiento de las plantas por sus efectos adversos en la vida biológica del suelo y en la estructura del mismo.

2.4 Espaciamiento entre drenes usando la ecuación de Glover-Dumm

El espaciamiento entre drenes (L) se calcula utilizando la ecuación de Glover-Dumm (Ecuación 7) para régimen no permanente, en donde se asume que el Nivel Freático (NF), inicialmente se encuentra en la misma posición que los drenes, y se considera que el suelo tiene una humedad a capacidad de campo (θ_{cc}) en la parte superior de los drenes. Esto implica que la aplicación de exceso de riego o lluvia, causan la elevación del NF (Figura 5). Al inicio el ascenso del NF es instantáneo y después se evalúa el descenso en el tiempo y espacio.

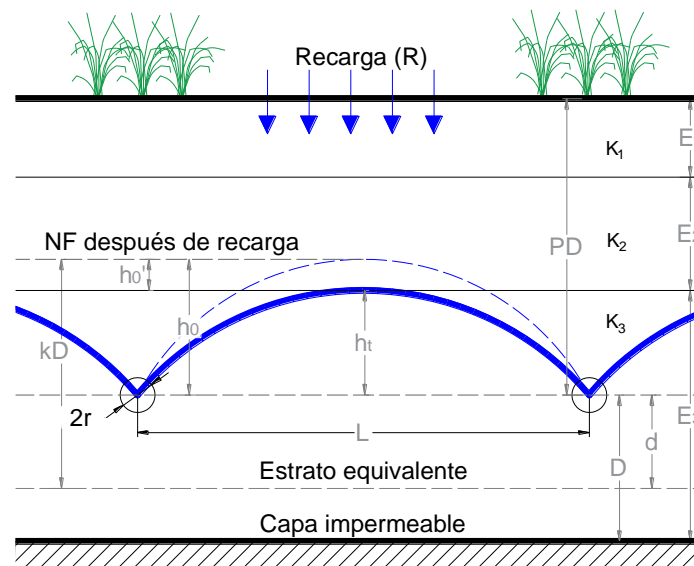


Figura 5. Esquema general de drenaje subterráneo.

$$L^2 = \frac{\pi^2 kD t}{\mu \ln \left(1.16 \frac{h_0}{h_t} \right)} \quad (7)$$

Donde: L = espaciamiento entre drenes (m); kD =transmisibilidad (m²d⁻¹); t = tiempo (días); μ = macroporosidad (adimensional); h₀= altura máxima del NF sobre los drenes (m); h_t= altura mínima del NF sobre los drenes (m).

La profundidad del NF 3 días (h'₍₃₎) después de existir una Recarga (R), debido al riego, debe alcanzar la profundidad mínima que no cause daños a los cultivos. Se sugiere que sea del 80 al 100% de la profundidad del cultivo. Cuando la recarga es por precipitación se debe seleccionar el mes más lluvioso del año, calculada para un periodo de retorno de entre 5 y 15 años. La profundidad mínima del NF recomendada 3 días después de la lluvia se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Profundidad de NF después de precipitación

Día	Pastos y	Cultivos	
	Hortalizas (m)	Extensivos (m)	Frutales (m)
0	0.3	0.5	0.9
1	0.5	0.8	1.1
2	0.7	1.0	1.3
3	0.8	1.1	1.4

Procedimiento de cálculo para el espaciamiento entre drenes:

1. Proponer una separación de drenes (L) y calcular el estrato equivalente de Hooghoudt (d).

$$d = \frac{L}{8(\mathbf{R}_H + \mathbf{R}_r)}, \quad \mathbf{R}_H = \frac{(L - 1.4D)^2}{8DL}, \quad \mathbf{R}_r = \frac{1}{\pi} \ln \left(0.7 \frac{D}{r} \right)$$

Donde: L = espaciamiento entre drenes (m); **R_H** = resistencia al flujo horizontal (adimensional); **R_r** = resistencia al flujo radial (adimensional); **D** = distancia del dren a la capa impermeable (m); r = radio del dren (m).

2. Calcular el ascenso del NF en cada recarga de riego (h₀), comparando la recarga de riego (RR_i) con las recargas acumuladas (R_{ac(i)}).
3. Calcular el descenso del NF, después de la recarga de riego (RR_i), cuando el NF se encuentra sobre varios estratos de suelo se realiza de la siguiente manera:
 - 3.1. Calcular el tiempo requerido para que el NF descienda hasta la interface de suelo inmediato inferior.

$$t_{(i)} = \frac{1}{\alpha_{(i)}} \ln \left(1.16 \frac{h_0}{h_{i+1}} \right), \quad \alpha_{(i)} = \frac{\pi^2 kD_{(i)}}{\mu_i L^2}$$

Donde: $\alpha_{(i)}$ = factor de reacción, considerando el estrato i (d^{-1}), $kD_{(i)}$ = transmisibilidad desde el estrato i , hasta d de Hooghoudt ($m^2 d^{-1}$).

Sí, h_0 se encuentra en el estrato 1, entonces el descenso de h_0 hasta h_1 , se calcula como:

$$t_{(1)} = \frac{1}{\alpha_{(1)}} \ln \left(1.16 \frac{h_0}{h_2} \right), \quad \alpha_{(1)} = \frac{\pi^2 kD_{(1)}}{\mu_1 L^2}$$

Y la transmisividad

$$kD_{(1)} = \left(\frac{h_0'}{2} \right) k_1 + E_2 k_2 + (E_3 - D + d) k_3$$

3.2. Construir cuadro de tiempos acumulados (Cuadro 2). Se calcula el tiempo de descenso desde h_0 , hasta el estrato en donde se encuentran los drenes.

Cuadro 2. Tiempo acumulado en el descenso del NF

E_i	$kD_{(i)}$ ($m^2 d^{-1}$)	$\alpha_{(i)}$ (d^{-1})	$t_{(i)}$ (d)	$t_{ac(i)}$ (d)
E_1	$kD_{(1)}$	$\alpha_{(1)}$	$t_{(1)}$	$t_{ac(1)} = t_{(1)}$
E_2	$kD_{(2)}$	$\alpha_{(2)}$	$t_{(2)}$	$t_{ac(2)} = t_{(1)} + t_{(2)}$
E_3	$kD_{(3)}$	$\alpha_{(3)}$	$t_{(3)}$	$t_{ac(3)} = t_{(1)} + t_{(2)} + t_{(3)}$

3.3. Con los tiempos acumulados, ubicar los estratos en los que se encuentra el NF a los 3 días después del riego y justo antes de aplicar el siguiente riego.

Sí, $t_{ac(1)} < 3 < t_{ac(2)}$, entonces el NF se ubica en el estrato 2. Por lo tanto, el tiempo faltante para los tres días es: $t_{(3\text{días})} = 3 - t_{ac(1)}$.

Sí, $t_{ac(2)} < \text{Intervalo de riego } (T_{(i)}) < t_{ac(3)}$, entonces el NF se ubica en el estrato 3. Por lo tanto, el tiempo faltante $t_{(f)}$ para el tiempo del intervalo de riego es $t_{(f)} = T_{(i)} - t_{ac(2)}$.

3.4. Calcular la posición del NF 3 días ($h_{(3)}$) después de aplicar riego y justo antes de aplicar el siguiente riego. Si se encuentra en E_3 .

Calcular $\alpha_{(2)} t_{(3\text{días})}$, si es ≥ 0.45 ;

$$h_{(3)} = 1.16 h_2 e^{-\alpha_{(2)} t_{(3\text{días})}}$$

Si es ≤ 0.45 ;

$$h_{(3)} = 1.16 h_2 \sum_{n=1,-3,5} \frac{1}{n} e^{-n^2 \alpha_{(2)} t_{(3\text{días})}}$$

Para ubicar el NF antes del siguiente riego se calcula $\alpha_{(3)} T_{(i)}$, si es ≥ 0.45 ;

$$h_{(i)} = 1.16 h_3 e^{-\alpha_{(3)} T_{(i)}}$$

Si es ≤ 0.45 ;

$$h_{(i)} = 1.16 h_3 \sum_{n=1,-3,5} \frac{1}{n} e^{-n^2 \alpha_{(3)} T_{(i)}}$$

4. Comparar $h_{(3)}$ contra $h'_{(3)}$. Sí, $[h'_{(3)} - 0.025m] \leq h_{(3)} \leq [h'_{(3)} + 0.025m]$ continuar con el cálculo para los siguientes riegos, de lo contrario proponer una nueva separación de drenes L y repetir los pasos de 2 a 4.
5. Si $h_{(3)}$ se encuentra dentro del rango de tolerancia, continuar con el cálculo:
 - 5.1. La siguiente recarga de riego, debe contemplar la lámina de exceso de riego aplicada, más la lámina residual del riego previo.
 - 5.2. Repetir los pasos 2 a 5, hasta revisar todos los riegos.

2.5 Evaluación de modelos matemáticos

Ayars y Evans (2015) menciona que los sistemas de drenaje no solo deben considerar la eliminación de agua, sino también el tratamiento y reutilización de esta, además emplear tecnología para la toma de datos requeridos en el diseño.

Por otro lado Strock et al. (2018) enfatizan que el mayor desafío para el diseño y manejo del sistema de drenaje es reducir los impactos aguas abajo debido a las pérdidas de N y P en las salidas de drenaje.

Las soluciones se han investigado y presentado en los simposios de drenaje de ASABE, pero la mayoría de ellas no se aplicarán en la escala necesaria para tratar adecuadamente el problema sin mejores incentivos para alentar su adopción.

De acuerdo con Zavala (2012) explica que existen tres escalas de estudios del movimiento del agua en el suelo las cuales son:

Escala microscópica. Corresponde a cada poro del suelo, el flujo microscópico se estima con la ley de Poiseuille, que proviene de las ecuaciones de Navier-Stokes.

Escala Macroscópica. El flujo macroscópico se estima con la ley de Darcy-Buckingham (1907), y la presión de agua es estimado con la ley de Laplace. La ecuación de transferencia correspondiente se conoce como ecuación de Richards (1931).

Escala Megascópica. La velocidad de flujo se estima con Darcy y se promedia considerando la hipótesis de Dupuit-Forcheimer. La ecuación de transferencia pertinente se conoce como la ecuación de Boussinesq, de aquí se deriva la ecuación de Glover-Dumm.

Zavala et al. (2005) han desarrollado un modelo para el drenaje del subsuelo agrícola basado en la ecuación de Richards bidimensional.

Por otro lado, Zavala et al. (2004) y Fuentes et al. (2009). Han estudiado el drenaje agrícola con la ecuación de Boussinesq y han deducido, respectivamente, la condición límite que se utilizará en los desagües agrícolas mediante esta ecuación.

Mehdinejadani, Naseri, Jafari, Ghanbarzadeh y Baleanu (2013) realizaron una evaluación experimental con dos modelos matemáticos en régimen transitorio, usando Glover-Dumm y un modelo desarrollado a partir de una ecuación fraccional unidimensional de Boussinesq (Chávez, Fuentes y Zavala, 2010) para predecir el perfil de la capa freática entres dos drenes subterráneos; encontraron que el modelo fraccionario en suelos homogéneos se reduce al modelo matemático de Glover-Dumm, y en suelos heterogéneos tiene mejor predicción el modelo de Boussinesq.

Darzi-Naftchally et al. (2014) realizaron una comparación entre las ecuaciones de drenaje para régimen permanente y transitorio evaluados usando la dinámica del concepto de equilibrio y el modelo DRAINMOD. Los espacios de drenaje calculados con las ecuaciones en estado transitorio (Glover-Dumm) se consideran más adecuadas que las obtenidas en las ecuaciones para régimen permanente.

Oyarce et al. (2017) en su Evaluación experimental de drenajes agrícolas probó que existe una resistencia de la entrada de agua a la tubería cuando estas se encuentran encerradas en una pantalla protectora.

Literatura citada

Ayars, J. E., & Evans, R. G. (2015). Subsurface Drainage - What's Next? *Irrigation and Drainage*, 64(3), 378–392. <https://doi.org/10.1002/ird.1893>

Breemen, N. Van, & Buurman, P. (2003). Soil Formation. In *Soil Formation* (2th ed.).

Darzi-Naftchally, A., Majid Miriatifi, S., & Asgari, A. (2014). Comparison of steady- and unsteady-state drainage equations for determination of subsurface drain spacing in paddy fields : a case study in Northern Iran. *Paddy Water Environ*, 12, 103–111. <https://doi.org/10.1007/s10333-013-0364-4>

Dregne, H. E. (2019). Soils of semiarid regions. In *In Natural Resources and Development in Arid Regions*. <https://doi.org/10.4324/9780429049378-5>

Flores, R. (2000). *Flujo de agua a través de suelos* (4th ed.).

Foth, H. D. (1990). *Fundamentals of soil science* (J. Wiley (ed.); 8th ed.).

Fuentes, C., Chávez, C., & Zataráin, F. (2010). Una solución analítica de la infiltración en un suelo con manto freático somero: Aplicación al riego por gravedad. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 1(3), 39–49.

Hanks, R. J., & Ashcroft, G. L. (1980). Applied Soil Physics. In *Advanced Series*

in Agricultural Sciences 8.

- Hillel, D. (1998). Environmental Soil Physics. In *Environmental Soil Physics*.
- Kirkham, M. B. (2005). Principles of Soil and Plant Water Relations. In Elsevier (Ed.), *Principles of Soil and Plant Water Relations* (6th ed.).
- Koorevaar, P., Menelik, G., & Dirksen, C. (1983). Elements of soil physics. In *Elements of soil physics*. <https://doi.org/10.1097/00010694-198510000-00012>
- Mehdinejadani, B., Naseri, A. A., Jafari, H., Ghanbarzadeh, A., & Baleanu, D. (2013). A mathematical model for simulation of a water table profile between two parallel subsurface drains using fractional derivatives. *Computers and Mathematics with Applications*, 66(5), 785–794. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2013.01.002>
- Morgan, R. P. C. (2005). Soil Erosión & Conservation. In Blackwell (Ed.), *Soil Erosión & Conservation* (3th ed.).
- Oyarce, P., Gurovich, L., & Duarte, V. (2017). Experimental evaluation of agricultural drains. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(4), 1–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001134](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001134)
- Rattan, L., & Manoj, K. S. (2004). Principles of Soil Physics. In *Books in soils, plants and the environment*. <https://doi.org/10.2136/vzj2004.0012br>
- Seiler, K. P., & Gat, J. R. (2007). Groundwater recharge from run-off, infiltration and percolation. In *Water Science and Technology Library*. <https://doi.org/10.1007/0-306-48065-4>
- Smith, K. A., & Mullins, C. E. (2000). Soil and Environmental. In *Physical Methods* (2th ed.). <https://doi.org/10.1081/e-ess3-120042638>
- Strock, J. S., Hay, C. H., Helmers, M. J., Nelson, K. A., Sands, G. R., Skaggs, R. W., & Douglas-Mankin, K. R. (2018). Advances in drainage: Selected works from the Tenth international drainage symposium. *Transactions of*

the ASABE, 61(1), 161–168. <https://doi.org/10.13031/trans.12668>

Zavala, M., Fuentes, C., & Saucedo, H. (2005). Radiación no lineal en la ecuación de Richards bidimensional aplicada al drenaje agrícola subterráneo. *Ingeniería Hidráulica En Mexico*, 20(4), 111–119.

Zavala, M., Saucedo, H., Bautista, C., & Fuentes, C. (2012). Comparison of Two Nonlinear Radiation Models for Agricultural Subsurface Drainage. *Drainage Systems*, 8, 165–180. <https://doi.org/10.5772/34466>

3 Diagnóstico de Drenaje en “La Cerona”

Ángel Hernández-Facundo¹

Jorge V. Prado-Hernández^{2*}

Mauricio Carrillo-García¹

Agustín Ruíz-García¹

¹Universidad Autónoma Chapingo, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, México, C. P. 56230, México.

²Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos. Carretera México- Texcoco km 38.5, Chapingo, México, C. P. 56230, México.

jpradoh@chapingo.mx, tel.: (+52) 5951010763 (*Autor de correspondencia).

3.1 Resumen

En el lote “La Cerona” se observó anegamiento parcial, que dificulta las labores de cultivo y disminuye la producción agrícola. Con la finalidad de conocer la magnitud y origen del problema se midió semanalmente la profundidad del nivel freático en 22 pozos de observación, desde junio de 2019 hasta abril del 2020, instalados en 9.31 ha del predio. Se inició el levantamiento topográfico con Estación Total Leica TS02 en dos puntos georreferenciados con GPS Ashtech ProMark 100 GNSS en los pozos 07 y 13, posteriormente se configuró topográficamente el área de cultivo y los ríos adyacentes. Para la obtención de las características del suelo se elaboraron dos perfiles pedológicos en donde se identificaron cinco horizontes del suelo; en cada uno se determinó la conductividad hidráulica (k), macroporosidad (μ) y contenido de humedad. El parámetro k se obtuvo con el método del pozo barrenado, midiendo el descenso del agua con una sonda HOB0 MX2001. Los planos de isobatas e isohipsas muestran el ascenso del nivel freático en septiembre, una semana después de la aplicación del riego, a partir de esta fecha hasta el 20 de enero la profundidad freática es menor a 1 m en 2.8 ha y menor a 2 m en 4.7 ha. La elevación del

fondo del cauce y superficie libre del agua del Río Chapingo se encuentra por arriba del nivel freático en los pozos paralelos, por lo tanto, se considera como una posible fuente de recarga.

Palabras clave: Anegamiento, Pozos de Observación, Nivel Freático, Conductividad Hidráulica, Isobatas e Isohipsas.

3.2 Abstract

In the lot called "La Cerona" partial flooding was observed, which makes cultivation work more difficult and decreases agricultural production. To know the magnitude and origin of the problem, the depth of the phreatic level was measured weekly in 22 observation wells, installed in 9.3 ha of the property. The topographic survey with Leica TS02 Total Station was started in two georeferenced points with Ashtech ProMark 100 GNSS GPS in wells 07 and 13, later the cultivation area and adjacent rivers were configured topographically. To obtain the soil characteristics, two pedological profiles were prepared in which five soil horizons were identified; in each one, hydraulic conductivity (k), macroporosity (μ) and moisture content were determined. The k parameter was obtained with the drilled hole method, measuring the descent of water with a HOBO MX2001 probe. The isobaths and isohypses maps show the rise of the water table in September, one week after the irrigation application. From this date until January 20, the water table depth is less than 1 m in 2.8 ha and less than 2 m in 4.7 ha. The elevation of the riverbed and free water surface of the Chapingo River is above the water table in the parallel wells; therefore, it is considered a possible source of recharge.

Keywords: Waterlogging, Observation Wells, Freatic Level, Hydraulic Conductivity, Isobaths and Isohipsas.

3.3 Introducción

La variación del nivel freático en la zona radicular de los cultivos agrícolas afecta directamente el crecimiento y producción (Zambrano et al., 2003; Jiménez et al., 2010; Muñoz Ruiz & León Quirós, 2016), además, dificulta las labores de cultivo (Ortega Corrales, 1996) y provoca la salinización del suelo (Mercado Fernández et al., 2011; Coras Merino et al., 2014). Las recargas al nivel freático que causan

esta variación en ocasiones se debe a las pérdidas por percolación profunda ocasionado por el riego superficial, pues, aunque los sistemas de riego presurizados y la gestión del riego han cambiado y se han ampliado en los últimos 50 años, el riego superficial sigue siendo el método predominante, y la eficiencia estimada a nivel mundial oscila entre el 30 y el 45% (Ayars y Evans, 2015).

En México existen 6.81 millones de ha bajo riego, de las cuales el 74.9% aún se aplica el riego por gravedad (Inegi, 2019). Esta superficie se encuentra dividido en 86 Distritos de Riego y más de 40 mil Unidades de Riego, donde el manejo del agua es de baja eficiencia global (Conagua, 2018).

Namuche Vargas et al. (2020) estiman que del 10% de área bajo riego y 16% de los 7.5 millones en zonas del trópico húmedo en el país presentan problemas de salinidad y drenaje en algún grado. Además, este problema se incrementa en 10 mil ha año⁻¹ en áreas de riego y disminuye la producción en un 25%.

En muchos casos, los problemas asociados a niveles freáticos someros se han controlado mediante la instalación de sistemas de drenaje subterráneo (Hornbuckle et al., 2007; J. E. Ayars et al., 2006) y son medidas importantes para mantener o mejorar la productividad de tierras agrícolas (Rimidis y Dierickx, 2004), sin embargo, el Manual de drenaje agrícola del IMTA (1986) indica que es necesario formular un diagnóstico para encontrar el origen del problema.

Para el diseño de un sistema de drenaje subterráneo se deben obtener datos acertados del suelo, cultivo, riego, freaticimetría, fuentes de recarga al drenaje, así como el estado de salinidad del suelo (J. E. Ayars et al., 2006), debido a que diseños incorrectos influyen en los rendimientos y eficiencias de los sistemas de drenaje subterráneo (Malota & Senzanje, 2016).

El presente trabajo tiene como objetivo determinar la magnitud y origen del problema de anegamiento parcial en el lote “La Cerona”, así como la caracterización de las variables requeridas para el diseño de drenaje agrícola subterráneo como una alternativa de solución real al problema analizado.

3.4 Materiales y métodos

3.4.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio denominado “La Cerona” pertenece al campo experimental Tlapeaxco del Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo, limita al norte con 520 m del Río Chapingo, al noroeste con 480 m de la carretera Federal México-Texcoco, al sureste con 270 m de áreas agrícolas y al sur con 110 m del Río San Bernardino (Figura 6). Tiene una superficie de 9.31 ha, se cultivó maíz y avena en el periodo de junio de 2019 a marzo de 2020, al cultivo de maíz se aplicó riego superficial a nivel de surcos con hidrantes y la avena se irrigó con un sistema de riego por aspersión.

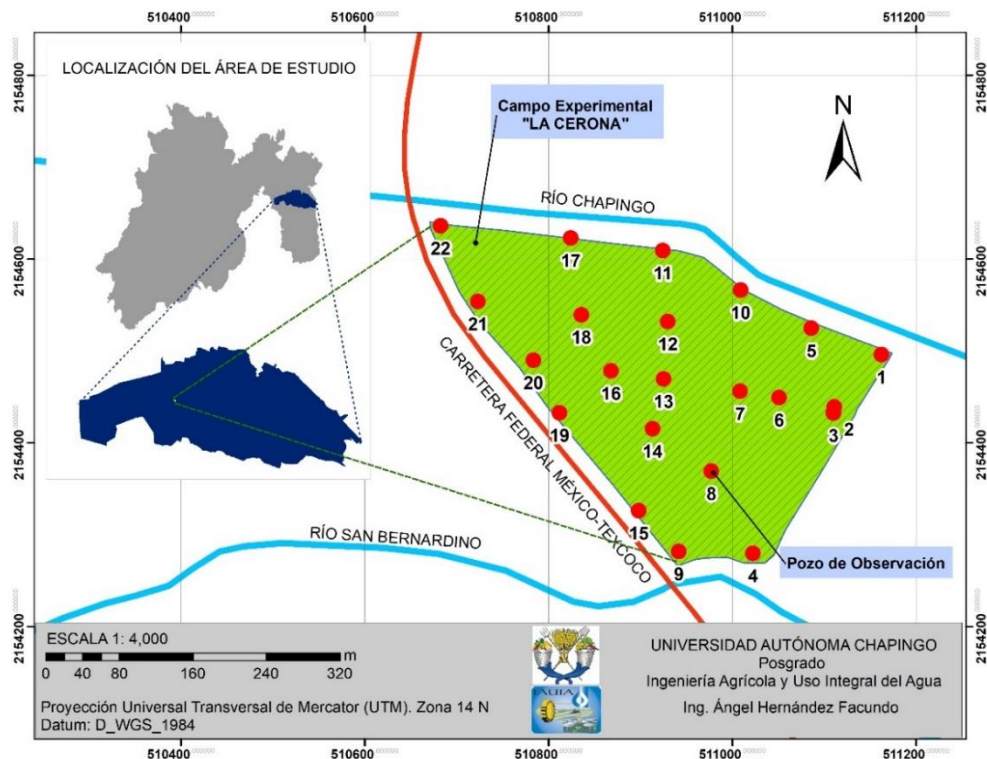


Figura 6. Ubicación de pozos de observación

3.4.2 Freatimetría

El estudio de freaticimetría tiene como finalidad conocer la variación espacial y temporal del Nivel Freático (NF), para la construcción de los pozos de observación se siguió la metodología usada por Rimidis y Dierickx (2004), Hornbuckle et al. (2007), (Malota & Senzanje, 2016) y (Bahçeci et al., 2018).

Se instalaron 22 pozos de observación con profundidades entre 2 y 3 m en toda

el área de estudio. Estos pozos consisten en tuberías de PVC de 75 mm de diámetro y orificios de 5 mm en toda su longitud, cubiertos con una malla de polietileno de 1.35 mm de abertura. Cada pozo se perforó de manera manual con una barrena tipo california de 100 mm de diámetro (Figura 7a), el espacio entre el suelo y el tubo se rellenó con grava menor a 20 mm de diámetro (Figura 7b). En la parte superior se construyó un brocal de concreto para impedir el ingreso de agua superficial y se colocó un clavo para su posterior georreferenciación con Estación Total (Figura 7c).



Figura 7a. Perforación manual
Figura 7b. Relleno de grava
Figura 7c. Brocal de concreto
Figura 7. Construcción de pozos de observación

La profundidad del NF se midió semanalmente del 24 de junio del 2019 hasta el 02 de abril del 2020, utilizando un dispositivo de inmersión electrónico con precisión de 5 mm, de acuerdo con Van Beers citado por Malota y Senzanje (2016) esta precisión está dentro del rango aceptable.

3.4.3 Topografía

El levantamiento topográfico es el conjunto de actividades realizadas en campo para capturar información que permita determinar las coordenadas rectangulares de los puntos del terreno (Pachas, 2009), sin embargo, para la ubicación de puntos georreferenciados se utiliza un GPS de alta precisión.

Las coordenadas para el inicio del levantamiento topográfico del área de estudio se obtuvieron con GPS Ashtech ProMark 100 GNSS en los piezómetros 07 y 13 (Figura 8), posteriormente se tomaron puntos con estación total Leica TS02 en una cuadrícula de 50x50 m dentro del área de cultivo y en puntos considerados importantes, para representar a detalle el relieve e infraestructura del lugar. Para conocer las elevaciones de la superficie libre del agua en los ríos adyacentes al

área de estudio, se realizó el levantamiento topográfico de las secciones transversales de los ríos Chapingo y San Bernardino (Figura 9) a cada 50 metros, en toda la longitud en colindancia con el predio “La Cerona”.



Figura 8. Puntos de arranque para el levantamiento topográfico

En cada sección transversal se tomaron puntos en bordos y taludes de los márgenes derecho e izquierdo, así como puntos para detallar el fondo del cauce. Se observa que el Río San Bernardino se encuentra revestido en su totalidad, por lo que se descarta como posible fuente de recarga al Nivel Freático.



Levantamiento topográfico Río Chapingo

Levantamiento topográfico Río San Bernardino

Figura 9. Levantamiento topográfico

3.4.4 Caracterización del suelo

J. E. Ayars et al. (2006) comentan que las investigaciones actuales toman muestras de suelo hasta la posible ubicación del drenaje (2-4 m) e incluso muestras más profundas para determinar la presencia de la capa impermeable,

Serrano-coronel et al. (2018) determina mediante análisis de laboratorio textura, densidad aparente y contenido de humedad las cuales utiliza en el diseño de la separación de drenes subterráneos.

Para este caso particular se elaboraron dos perfiles pedológicos (Figura 10); el perfil (a) se elaboró dentro del área de cultivo a 5 m del pozo de observación 15; el perfil (b) se elaboró a 4 m del pozo de observación 01. En cada perfil pedológico se identificaron cinco horizontes de suelo; en cada uno, se determinó la conductividad hidráulica (k), macroporosidad (μ) y contenido de humedad.



Figura 10. Perfiles pedológicos

El parámetro k se obtuvo con el método del pozo barrenado, la cual consiste en perforar un pozo hasta el estrato de interés, agregar agua inmediatamente hasta unos 10 cm antes de llegar al estrato inmediato y tomar las lecturas del descenso del agua dentro del pozo con sus respectivos tiempos. El descenso del agua para el caso estudiado se realizó con una sonda HOB0 MX2001 (Figura 11), con precisión de 3 mm y rango de respuesta de 1 s a temperatura estable.



Figura 11. Determinación de conductividad hidráulica.

3.5 Resultados y discusión

Las coordenadas georreferenciadas para el inicio del levantamiento topográfico que se obtuvieron con el GPS (Cuadro 3) ubican al área de estudio en la zona 14 Norte de la proyección Universal Transversal de Mercator (UTM) y Datum D_WGS_1984.

Cuadro 3. Coordenadas de referencia para el levantamiento topográfico.

Referencia	X	Y	Z	Observación
1	510925.530	2154469.460	2239.051	Sobre clavo del Pozo 13
2	511008.908	2154456.209	2239.358	Sobre clavo del Pozo 07

En el cuadro 4 se presentan las coordenadas de los 22 pozos de observación (PO) y en la Figura 12 el plano topográfico configurado en el programa CivilCAD 3D, con curvas de nivel a cada 0.5 metros, así como la vista en planta del eje del Río Chapingo con estaciones a cada 20 metros.

Cuadro 4. Coordenadas de Pozos de Observación

PO	X	Y	Z
1	511162.7521	2154496.0954	2239.833
2	511111.4441	2154439.1452	2239.773
3	511110.5140	2154432.2912	2239.476
4	511022.8874	2154279.6162	2240.177
5	511086.4457	2154524.6108	2239.285
6	511051.2908	2154449.3024	2239.480
7	511008.9081	2154456.2092	2239.358
8	510977.3673	2154369.1061	2239.554
9	510941.9247	2154281.5967	2239.831
10	511009.3077	2154566.1948	2238.923
11	510924.7443	2154609.0875	2238.640
12	510930.0778	2154531.9163	2238.734
13	510925.5300	2154469.4600	2239.051
14	510913.5165	2154415.1491	2239.012
15	510898.4224	2154326.2033	2239.447
16	510868.3021	2154478.1809	2238.727
17	510824.4319	2154622.9400	2238.557
18	510836.2255	2154539.3792	2238.419
19	510812.2442	2154432.5832	2238.653
20	510783.9196	2154489.7919	2238.481
21	510723.3782	2154553.7850	2238.124
22	510682.9059	2154636.2005	2238.229

La diferencia de elevaciones en el predio es de 2 m, la pendiente resulta de 0.004 en dirección este-oeste y la parte más baja se encuentra en los pozos 21 y 22. Se anula el aporte al NF por escurrimiento superficial debido a que el lote se ubica entre el bordo del Río Chapingo al norte, bordo del Río San Bernardino al sur, terraplén de la carretera Federal México- Texcoco al oeste y el bordo del camino que divide las diferentes áreas de cultivo al este.

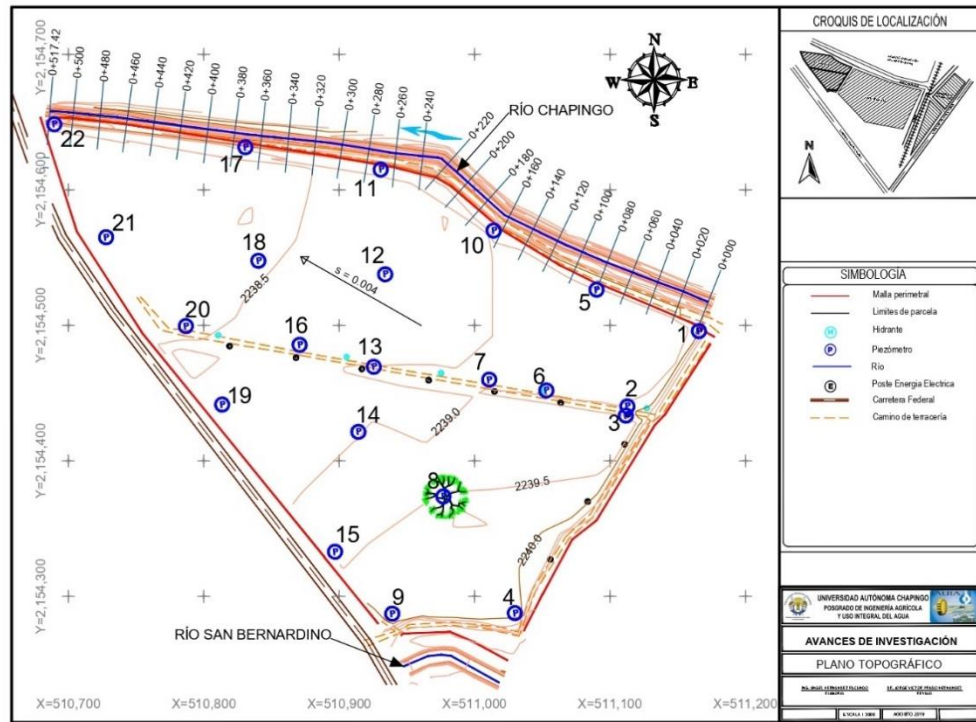


Figura 12. Plano topográfico

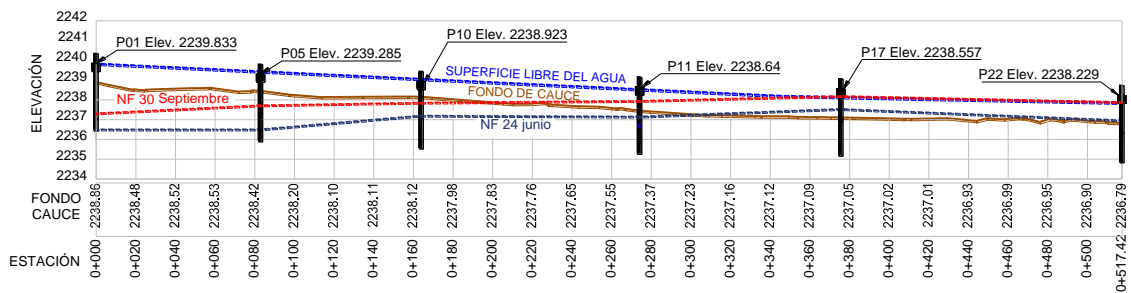


Figura 13. Elevaciones del cauce Río Chapingo

De acuerdo con el perfil longitudinal (Figura 13) y las secciones transversales del Río Chapingo (Figura 14) la Superficie Libre del Agua (SLA) se encuentra en una cota superior respecto al NF del 24 de junio, comparado con el NF del 30 de septiembre este está 0.1 m por abajo en los últimos 140 m de eje. Dado lo anterior

se considera al Río Chapingo como una posible fuente de recarga al NF, debido a que el Río Chapingo no se encuentra revestido y puede existir perdidas por percolación profunda e infiltración, además no esta funcionando como un drenaje natural.

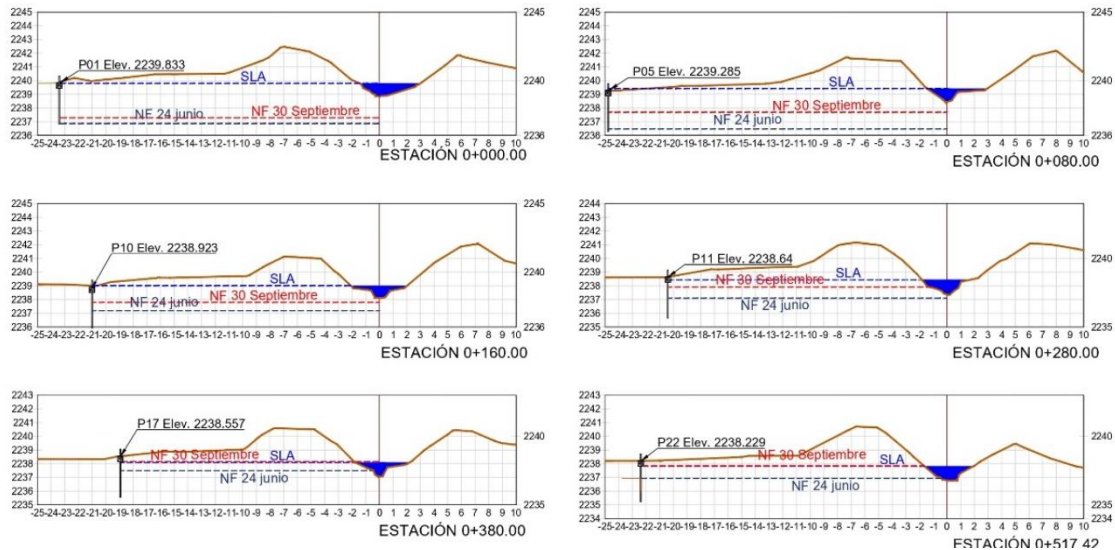


Figura 14. Secciones transversales del Río Chapingo

Las características del suelo se muestran en el Cuadro 5 y 6. De la clasificación elaborada en campo diferenciando color, textura y compactación se obtuvieron cinco estratos con diferentes espesores para el perfil (a) y (b), sin embargo, los resultados de laboratorio muestran igual textura franco-arenoso para el perfil (a) y una variación de franco a arcilla-arenosa en el perfil (b). La conductividad hidráulica cambia de un perfil a otro aun siendo los mismos estratos, en el perfil (a) la k es muy variable con diferencias de 0.2337 entre el estrato 1 y 2, para el perfil (b) la diferencia máxima es de 0.3370 en el estrato 2 y 3, y la macroporosidad es similar en el estrato 1, pero diferente en 0.1 en los estratos subsiguientes.

Cuadro 5. Características Perfil (a).

Estrato	Espesor (m)	Textura	θ_{CC} (%)	θ_{PMP} (%)	θ_S (%)	θ_{act} (%)	K (md ⁻¹)	μ (adim)	Da (gcm ⁻³)
1	0.30	Franco arenoso	41.98	25.44	55.92	34.17	0.0449	0.1353	1.55
2	0.15	Franco arenoso	17.34	9.94	26.97	14.64	0.2786	0.1361	1.62
3	0.30	Franco arenoso	17.83	13.07	24.60	15.90	0.2245	0.0670	1.76
4	0.35	Franco arenoso	15.81	6.70	29.04	13.26	0.0898	0.1323	1.62
5	3.90	Franco arenoso	34.16	17.65	42.49	28.91	0.2246	0.0833	1.63

Cuadro 6. Características Perfil (b).

Estrato	Espesor (m)	Textura	θ_{cc} (%)	θ_{PMP} (%)	θ_s (%)	θ_{act} (%)	K (md ⁻¹)	μ (adim)	Da (gcm ⁻³)
1	0.50	Franco arcillo-arenosa	25.89	14.91	38.65	34.17	0.1913	0.1276	1.48
2	0.18	Arcillosa	43.72	26.08	66.01	14.64	0.1123	0.2229	1.46
3	0.18	Franca	37.46	23.16	54.97	15.90	0.4493	0.1751	1.16
4	0.47	Franca	37.25	19.26	57.51	13.26	0.2046	0.2026	1.22
5	0.50	Franca	31.87	16.58	46.76	28.91	0.1326	0.1489	1.46

El plano de Elevaciones mínimas (Figura 15) se elabora con las elevaciones más bajas del NF de cada pozo de observación, aunque no muestra las condiciones de flujo en un tiempo específico, ya que las lecturas no corresponden a una sola observación, sí representa las elevaciones del NF de cada lugar cuando éstos reciben las menores aportaciones, es decir, que representa el momento más aproximado a la condición de régimen permanente y establecido.

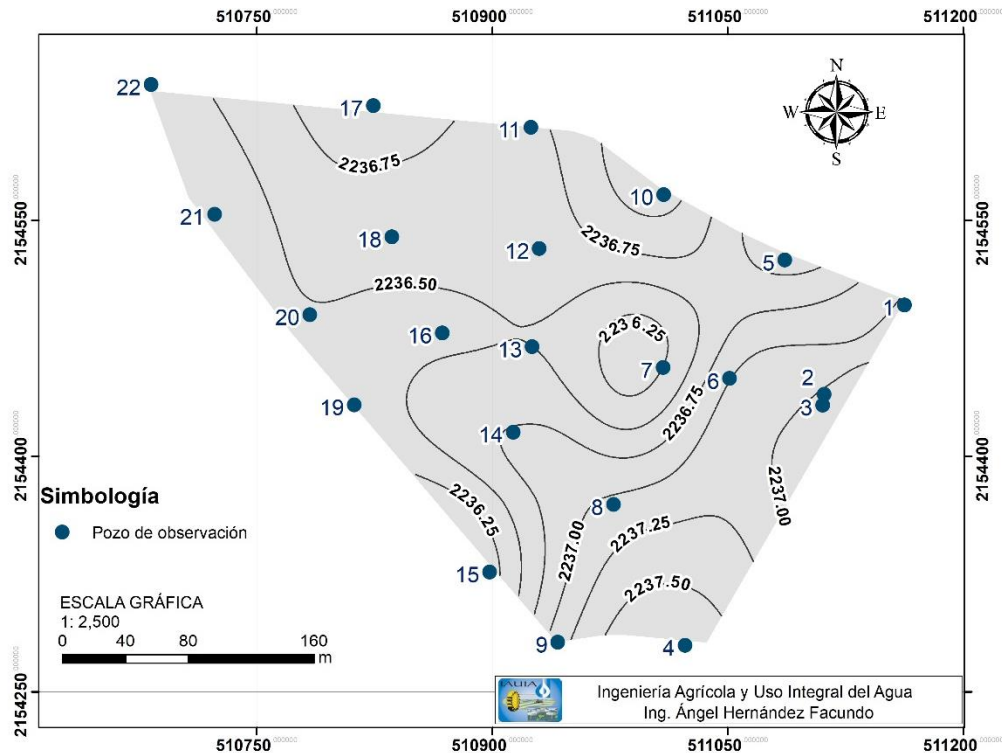


Figura 15. Mínimas elevaciones del Nivel Freático.

Los planos de isobatas elaborados para cada lectura de piezómetros muestran que la profundidad del NF es superior a 1.0 m, desde 24 de junio hasta el 26 de

agosto del 2019 (Figura 16a). La lectura posterior realizada el 02 de septiembre (Figura 16b) manifestó anegamiento en el piezómetro 18. A partir de estas fechas se observaron diferentes variaciones en el NF ocasionados por el inicio del riego el 19 de agosto, 14 días antes de que aflorara en la superficie. En la Figura 16c se presenta la máxima afectación del NF con profundidades menores a 1 m en un 50% de la superficie, después de esta fecha se presenta un descenso hasta el 11 de noviembre (Figura 16d) para llegar a profundidades mayores de 1 m el 18 de noviembre. En esta fecha se inició el riego para el cultivo de avena y el NF volvió a ascender llegando al máximo afloramiento el 09 de diciembre (Figura 16e) en 43% de la superficie, recuperando la profundidad mayor a 1m en marzo de 2020 (Figura 16f).

Es importante mencionar que cuando existen precipitaciones y riegos intensos el NF es reflejado inmediatamente en los piezómetros.

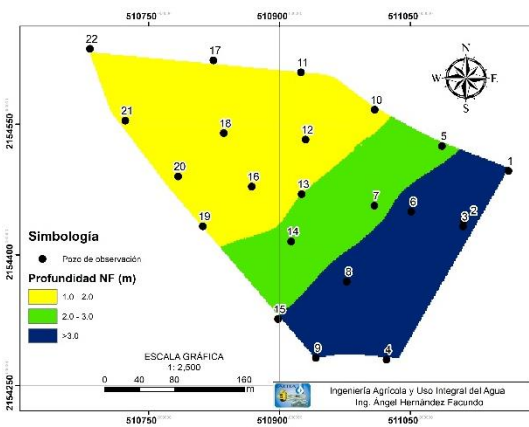


Figura 16a. 24 junio

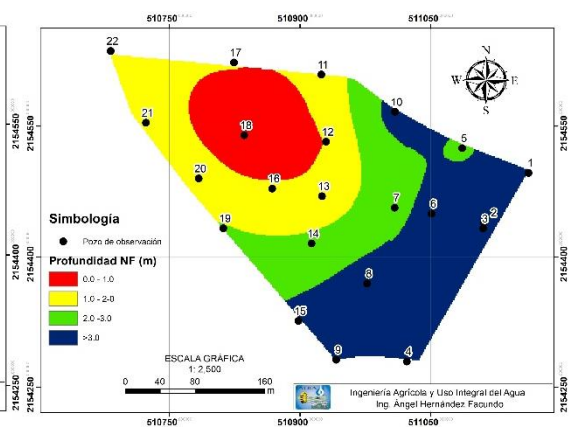


Figura 16b. 02 septiembre 2019

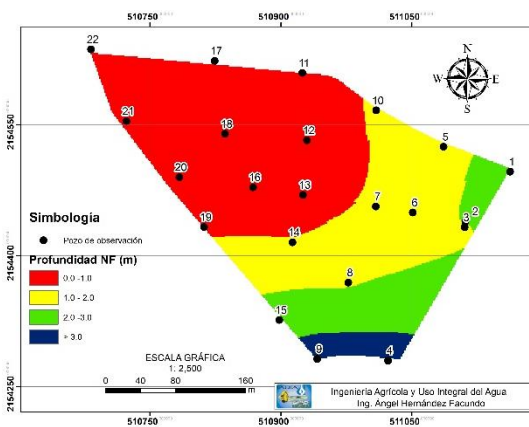


Figura 16c. 30 septiembre 2019

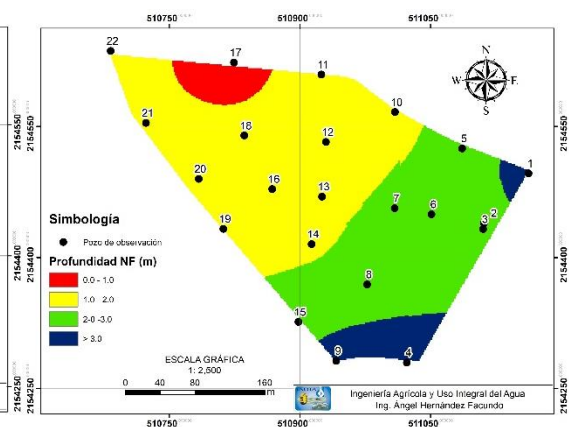


Figura 16d. 11 noviembre 2019

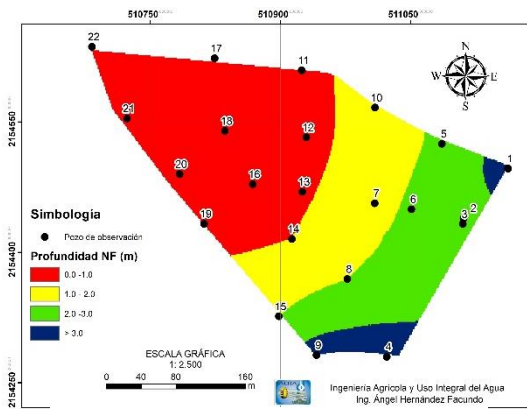


Figura 16e. 09 diciembre 2019

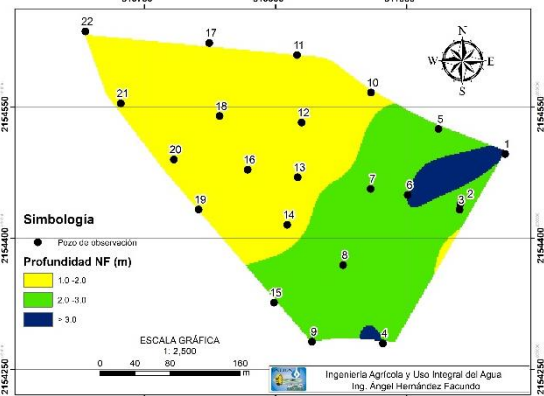


Figura 16f. 23 marzo 2020

Figura 16. Planos de Isobatas

Los planos de isohipsas se elaboran con las elevaciones del NF en estos planos se puede observar la dirección del flujo en cada lectura registrada, de acuerdo con las Figuras 17a, 17b, 12c, 17d, 17e y 17f la dirección del flujo es variable, algunas veces paralelo a la pendiente del terreno y otras veces completamente opuesto, esto se origina debido al punto de aplicación del riego, moviéndose de mayor a menor elevación. Conforme al plano topográfico, el NF emerge en su mayor parte en la parte más baja del predio ubicado en la parte noroeste del Lote “La Cerona”, asociado a la obstrucción de drenaje por el terraplén de la carretera Federal México- Texcoco, pues sin esta barrera el flujo subterráneo se movería aguas abajo del Río Chapingo.

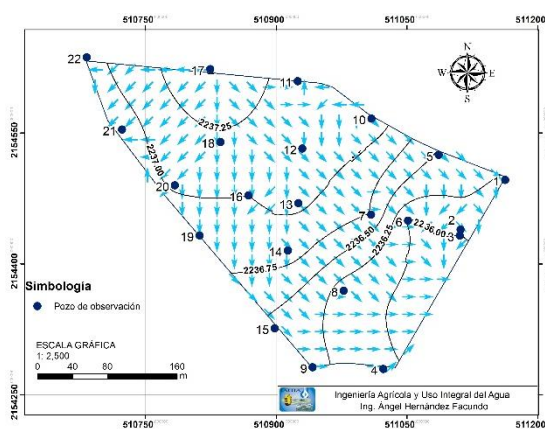


Figura 17a. 24 junio

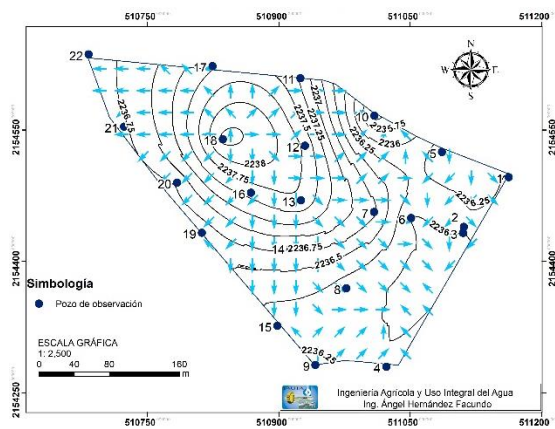


Figura 17b. 02 septiembre 2019

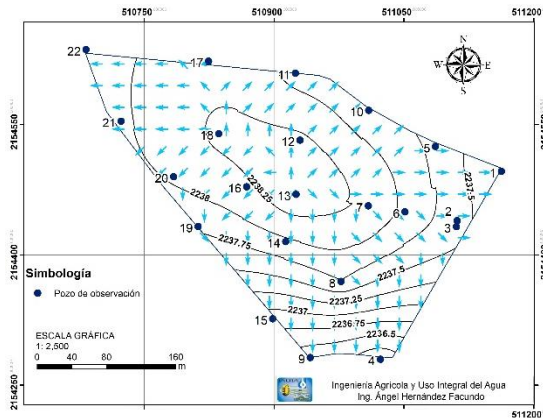


Figura 17c. 30 septiembre 2019

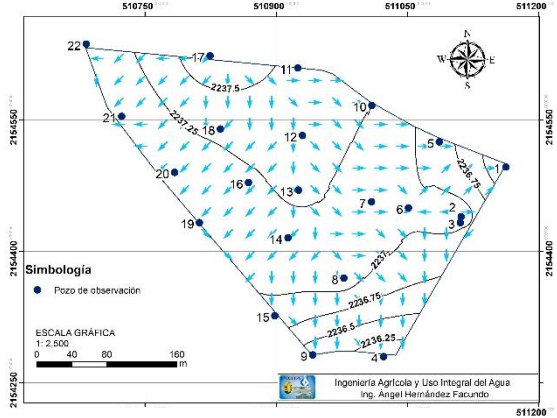


Figura 17d. 11 noviembre 2019

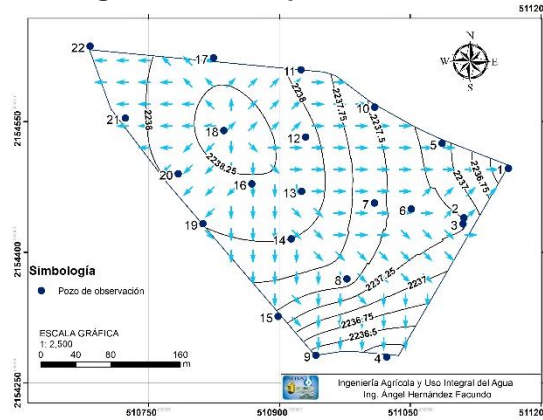


Figura 17e. 09 diciembre 2019

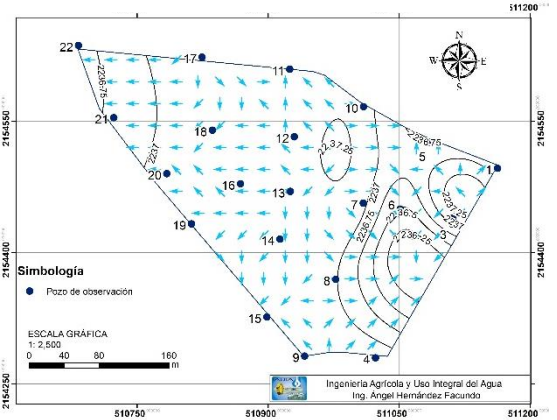


Figura 17f. 23 marzo 2020

Figura 17. Planos de Isohipsas

La gráfica Área-Tiempo elaborada con las áreas acumuladas de las diferentes profundidades del NF para cada una de las observaciones (Figura 18), muestra que aproximadamente 50% de la superficie el NF se encuentra a una profundidad de 0 a 2 m en todo el periodo analizado. A partir de agosto y dos semanas después del primer riego el NF es menor a 1 m en un 30%, aumentando su profundidad a 2 m la tercera semana de noviembre y volviendo a disminuir la profundidad a 1 m a finales de noviembre hasta mediados de enero. Del 20 de enero hasta mediados de marzo, el nivel freático disminuye a 1 m en 20% de la superficie del predio, aumentando a 2 m únicamente el 10 de febrero. A inicios del mes de marzo el NF se encuentra a una profundidad de 2 m y aumentando a 3 m en un 50% de la superficie, desde esta fecha no se registran riegos, por eso la profundidad del NF aumenta.

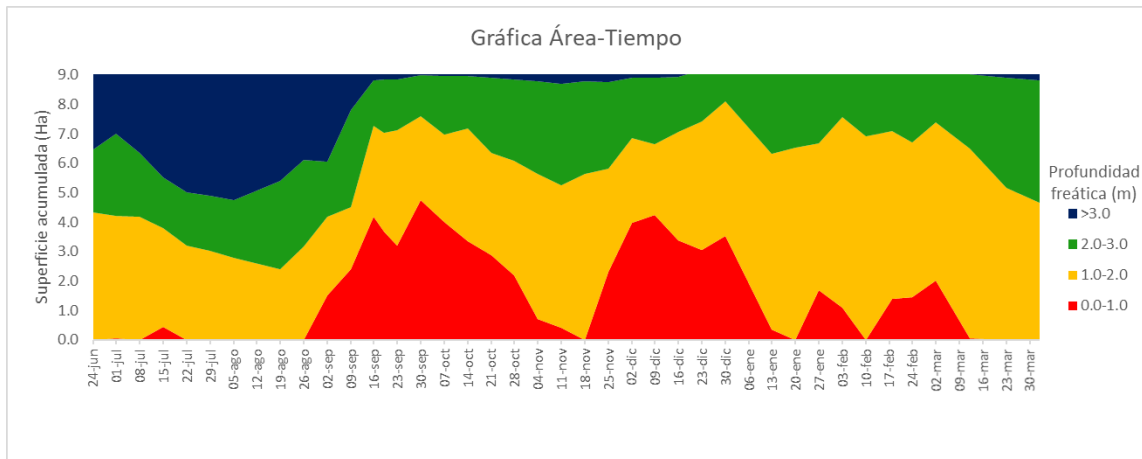


Figura 18. Profundidad del Nivel Freático-Área-Tiempo

3.6 Conclusiones

El Nivel Freático está a profundidades menores a 1 m en un 30% de la superficie del Lote “La Cerona” de agosto de 2019 a marzo de 2020 y profundidades mayores de 1 m en un 50% de la superficie en todo el periodo analizado, con variaciones en la profundidad freática ocasionado por aplicación de riego.

El anegamiento se manifiesta principalmente en la parte más baja del predio, junto a los pozos 20, 21 y 22, el terraplén de la carretera Federal México-Texcoco impide el movimiento del flujo subterráneo aguas abajo, además el Río Chapingo no funciona como drenaje natural, sino como fuente de recarga al NF.

El afloramiento del NF coincide con los dos ciclos de cultivo bajo riego, por lo tanto, existe un efecto directo de recarga de NF debido al riego.

El NF se mueve en los estratos 1 y 2 a profundidades menores de 1m, sin embargo, para evitar afectaciones en los cultivos de maíz y avena se recomienda un nivel freático con profundidad de 1.1 m, por lo tanto, el NF se movería en los estratos 4 y 5.

Para recuperar la zona afectada por nivel freático somero ocasionado por el riego, sería necesario aumentar la eficiencia de aplicación de los sistemas utilizados, además revestir o colocar un dren interceptor paralelo al Río Chapingo que impida la recarga al NF, sin embargo, con el tiempo este problema podría presentarse nuevamente e incluso podría ser afectado por salinidad. Por tal

motivo se propone como alternativa de solución el diseño de un sistema de drenaje subterráneo para disminuir el NF.

El espaciamiento de drenes se calcula muchas veces con ecuaciones en régimen permanente debido a la falta de información, sin embargo, las ecuaciones que más representan este fenómeno físico son las de régimen transitorio, que muchas veces resultan deficientes por falta de determinación de parámetros del suelo. A pesar de existir modelos matemáticos que describen de manera certera el fenómeno, suelen ser demasiados complejas.

Para saber qué modelo matemático se aproxima más al fenómeno descrito es necesario realizar una evaluación experimental de dichas ecuaciones matemáticas.

3.7 Agradecimientos

El autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico para realizar este trabajo. Al Dr. Jorge Victor Prado Hernández por el asesoramiento y guía brindada, así como al Dr. Mauricio Carrillo García y al Dr. Agustín Ruíz García.

3.8 Literatura citada

- Ayars, J. E., Christen, E. W., & Hornbuckle, J. W. (2006). Controlled drainage for improved water management in arid regions irrigated agriculture. *Agricultural Water Management*, 86(1–2), 128–139. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.07.004>
- Ayars, James E., & Evans, R. G. (2015). Subsurface Drainage - What's Next? *Irrigation and Drainage*, 64(3), 378–392. <https://doi.org/10.1002/ird.1893>
- Bahçeci, I., Nacar, A. S., Topalhasan, L., Tari, A. F., & Ritzema, H. P. (2018). A New Drainpipe-Envelope Concept for Subsurface Drainage Systems in Irrigated Agriculture. *Irrigation and Drainage*, 67(May), 40–50. <https://doi.org/10.1002/ird.2247>
- Breemen, N. Van, & Buurman, P. (2003). Soil Formation. In *Soil Formation* (2th ed.).
- Chávez, C., Fuentes, C., & Zavala, M. (2010). Solución en diferencias finitas de la ecuación de Boussinesq del drenaje agrícola con porosidad drenable variable y sujeta a una condición de radiación fractal. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 1(4), 105–117.

- CONAGUA. (2018). *Estadísticas del Agua en México* (2018th ed.).
http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/eam_2018.pdf
- Coras Merino, P. M., Ontiveros Capurata, R., & Diakite Diakite, L. (2014).
 Movimiento del agua freática y concentración de sales en suelos agrícolas.
Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 5(4), 537–548.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v5i4.917>
- Darzi-Naftchally, A., Majid Miriatifi, S., & Asgari, A. (2014). Comparison of
 steady- and unsteady-state drainage equations for determination of
 subsurface drain spacing in paddy fields : a case study in Northern Iran.
Paddy Water Environ, 12, 103–111. <https://doi.org/10.1007/s10333-013-0364-4>
- Djurovic, N., & Stricevic, R. (2003). Application of Kraijenhoff Van de Leur -
 Maasland's method in drainage. *Journal of Agricultural Sciences, Belgrade*,
 48(2), 159–170. <https://doi.org/10.2298/jas0302159d>
- Dregne, H. E. (2019). Soils of semiarid regions. In *In Natural Resources and
 Development in Arid Regions*. <https://doi.org/10.4324/9780429049378-5>
- Foth, H. D. (1990). *Fundamentals of soil science* (J. Wiley (ed.); 8th ed.).
- Hillel, D. (1998). Environmental Soil Physics. In *Environmental Soil Physics*.
- Hornbuckle, J. W., Christen, E. W., & Faulkner, R. D. (2007). Evaluating a multi-
 level subsurface drainage system for improved drainage water quality.
Agricultural Water Management, 89(3), 208–216.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.01.004>
- IMTA. (1986). *Manual de drenaje de zonas tropicales*.
<http://hdl.handle.net/20.500.12013/966>
- Inegi. (2019). *Encuesta Nacional Agropecuaria*.
https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ena/2019/doc/irg_ena2019.pdf
- Jiménez, J. de la C., Moreno, L. P., & Magnitskiy, S. (2012). Respuesta de las
 plantas a estres por inundacion. *Revista Colombiana de Ciencias
 Hortícolas*, 6(1), 96–109.
- Kirkham, M. B. (2005). Principles of Soil and Plant Water Relations. In Elsevier
 (Ed.), *Principles of Soil and Plant Water Relations* (6th ed.).
- Koorevaar, P., Menelik, G., & Dirksen, C. (1983). Elements of soil physics. In
Elements of soil physics. <https://doi.org/10.1097/00010694-198510000-00012>
- Leij, F. J., Toride, N., & Tseng, P.-H. (1999). Alternative Approaches for
 Modeling Solute Transport. *Agronomy Monograph*, 12(38), 431–465.
<https://doi.org/10.2134/agronmonogr38.c12>
- Malota, M., & Senzanje, A. (2016). A diagnosis of sub-surface water table

- dynamics in low hydraulic conductivity soils in the sugar cane fields of Pongola, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, 92, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.10.004>
- Mehdinejadiani, B., Naseri, A. A., Jafari, H., Ghanbarzadeh, A., & Baleanu, D. (2013). A mathematical model for simulation of a water table profile between two parallel subsurface drains using fractional derivatives. *Computers and Mathematics with Applications*, 66(5), 785–794. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2013.01.002>
- Mendoza Palacios, J. de D., Nikolskii Gavrilov, I., Landeros Sánchez, C., Palma López, D. J., Carrillo Ávila, E., & Estrada Botello, M. (2003). Análisis del funcionamiento hidráulico de diferentes tipos de drenaje agrícola en Tabasco, Mexico. *Ingeniería Hidráulica En México*, XVIII(2), 107–119.
- Mercado Fernández, T., Ortega Escobar, M., Arenas Tawil, A., & Combatt Caballero, E. (2011). Dinámica de sales en el distrito de riego La Doctrina, Colombia. *Idesia (Chile)*, 29(1), 83–90. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292011000100011>
- Morgan, R. P. C. (2005). Soil Erosión & Conservation. In Blackwell (Ed.), *Soil Erosión & Conservation* (3th ed.).
- Muñoz Ruiz, C., & León Quirós, J. (2016). El rol del nivel freático en el rendimiento del banano (Musa AAA) clon gran enano. *Tecnología En Marcha*, 15(3), 18–24.
- Namuche Vargas, J. R., Olvera Salgado, M. D., Saucedo Rojas, H. E., Fuentes Ruíz, C., & Arellano Monterrosas, J. L. (2020). Desarrollo y evolución del drenaje agrícola en México. *Revista Ingeniería Agrícola*, 9(4), 1–26.
- Ortega Corrales, L. J. (1996). *Diagnostico y consecuencias del mal drenaje en el sur de Chile. Proyecto: Estudio de Investigación y Validación de Tecnología de Drenaje en las IX-X-XI Regiones.*
- Oyarce, P., Gurovich, L., & Duarte, V. (2017). Experimental evaluation of agricultural drains. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(4), 1–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001134](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001134)
- Pachas, R. (2009). El levantamiento topográfico: Uso del GPS y estación total. *ACADEMIA -Trujillo-Venezuela*, 8(16), 29–45. <http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/30397/1/articulo3.pdf>
- Rattan, L., & Manoj, K. S. (2004). Principles of Soil Physics. In *Books in soils, plants and the environment*. <https://doi.org/10.2136/vzj2004.0012br>
- Rimidis, A., & Dierickx, W. (2004). Field research on the performance of various drainage materials in Lithuania. *Agricultural Water Management*, 68(2), 151–175. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.03.004>
- Scheumann, W., & Freisem, C. (2002). The role of drainage for sustainable agriculture. *Journal of Applied Irrigation Science*, 37(1), 33–61.

- Seiler, K. P., & Gat, J. R. (2007). Groundwater recharge from run-off, infiltration and percolation. In *Water Science and Technology Library*.
<https://doi.org/10.1007/0-306-48065-4>
- Serrano-coronel, G., Chipana-rivera, R., Moreno-pérez, M. F., & Roldán-Cañas, J. (2018). Study of vertical water flows contribution to the crop water consumption in suka kollus using a mixed drainage system. *Agricultural Water Management*, 206, 86–94.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.05.003>
- Smedema, L. K. (2007). Nine international drainage workshop: history, objectives, content and reflections on significance and impacts. *Irrigation and Drainage*, 56, 23–34. <https://doi.org/10.1002/ird.341>
- Smith, K. A., & Mullins, C. E. (2000). Soil and Environmental. In *Physical Methods* (2th ed.). <https://doi.org/10.1081/e-ess3-120042638>
- Strock, J. S., Hay, C. H., Helmers, M. J., Nelson, K. A., Sands, G. R., Skaggs, R. W., & Douglas-Mankin, K. R. (2018). Advances in drainage: Selected works from the Tenth international drainage symposium. *Transactions of the ASABE*, 61(1), 161–168. <https://doi.org/10.13031/trans.12668>
- USBR (United States Bureau of Reclamation). (1993). *Drainage Manual: A Water Resources Technical Publication*.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- van der Ploeg, R. R., Horton, R., & Kirkham, D. (1999). *Steady Flow to Drains and Wells* (Issue 38). <https://doi.org/10.2134/agronmonogr38.c6>
- Zambrano, F., Villafaña, R., & Figueroa, R. (2003). Efecto De La Profundidad Del Nivel Freático Sobre La Producción De Tomate En Un Suelo Franco Arenoso Y Bajo Condiciones De Invernadero. *Agronomía Tropical*, 53(4), 22–31.

4 Evaluación de modelos matemáticos para el cálculo de la separación de drenes subterráneos parcelarios

Ángel Hernández-Facundo¹

Jorge V. Prado-Hernández^{2*}

Mauricio Carrillo-García¹

Agustín Ruíz-García¹

¹Universidad Autónoma Chapingo, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, México, C. P. 56230, México.

²Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos. Carretera México- Texcoco km 38.5, Chapingo, México, C. P. 56230, México.

jpradoh@chapingo.mx, tel.: (+52) 5951010763 (*Autor de correspondencia).

4.1 Resumen

Las ecuaciones de régimen permanente utilizados en el cálculo de la separación de drenes agrícolas subterráneos tienen importantes simplificaciones, por lo que se consideran más apropiadas las ecuaciones de régimen transitorio. Se construyó un modelo físico en el laboratorio para representar un sistema de drenaje subterráneo, donde se midió la profundidad del perfil de agua en un suelo saturado, abatido por dos drenes subterráneos paralelos de 1.2 cm de diámetro, separación de 1.4 m y pendiente de 1% y se comparó con el perfil de agua calculado a través de las ecuaciones de Glover-Dumm y Kraijenhoff. El modelo físico se fabricó con paredes de acrílico transparente con dimensiones de 2.43x1.23x1.23 m, reforzado con una estructura de aluminio. Se rellenó con suelo de textura franco, perteneciente al campo experimental “La Cerona” de la Universidad Autónoma Chapingo, específicamente del estrato 4 y 5. Estos estratos tienen densidades de 1.22 y 1.46 g cm⁻³ y conductividades hidráulicas de 0.65 y 0.35 m día⁻¹. Para medir el perfil de agua dentro del modelo, se instalaron nueve pozos de observación en el centro del modelo con separaciones de 11, 17, 25.6, 23.3, 23,3, 25.6, 17 y 11 cm, se colocaron sensores encoder en

el extremo superior para medir la profundidad del agua. Conectados a estos pozos de observación se instalaron piezómetros en una pared lateral y se midió de manera manual la carga hidráulica. La ecuación más precisa para el cálculo de la separación de drenes agrícolas subterráneos es la de Glover-Dumm.

Palabras clave: Modelo físico, Perfil de agua, suelo saturado, drenaje agrícola subterráneo.

4.2 Abstract

The permanent regime equations used in the calculation of the separation of subway agricultural drains have important simplifications, these equations consider homogeneous and isotropic soils and constant recharge, so the transitional regime equations are considered more appropriate. A physical model was built in the laboratory to represent a subway drainage system, where the depth of the water profile was measured in a saturated soil, downgraded by two parallel subway drains of 1.2 cm in diameter, 1.4 m separation and 1% slope, and compared with the water profile calculated through the Glover-Dumm and Kraijenhoff equations. The physical model was manufactured with transparent acrylic walls with dimensions of 2.43x1.23x1.23 m, reinforced with an aluminum structure. It was filled with loamy textured soil, belonging to the experimental field "La Cerona" of the Universidad Autónoma Chapingo, specifically from strata 4 and 5. These strata have densities of 1.22 and 1.46 g cm⁻³ and hydraulic conductivities of 0.65 and 0.35 m dia⁻¹. To measure the water profile within the model, nine observation wells were installed in the center of the model with separations of 11, 17, 25.6, 23.3, 23.3, 25.6, 17 and 11 cm, encoder sensors were placed at the top end to measure water depth. Connected to these observation wells, piezometers were installed on a side wall and the hydraulic load was measured manually. The most accurate equation for calculating the separation of subway agricultural drains is the Glover-Dumm equation.

Keywords: Physical Model, Water Profile, Saturated Soil, Underground Agricultural Drainage.

4.3 Introducción

Las zanjas abiertas y las tuberías enterradas son dos sistemas de drenaje agrícola (Oyarce et al., 2017), los diseños de estos sistemas se limitan a la eliminación del exceso de agua del perfil del suelo y a mantener la posición del nivel freático en el punto medio de diseño (Ayars y Evans, 2015). Scheumann y Freisem (2002) identificaron el drenaje como el factor olvidado para sustentar la agricultura. Sin embargo, reconocen que es necesario para mantener la producción agrícola. Ayars, Christen y Hornbuckle (2006) detallan que los beneficios derivados del drenaje agrícola son una mejor producción de cultivos, mejor aireación del suelo, mejor capacidad de tránsito de equipo agrícola, una mejor gestión de salinidad del suelo, protección a la infraestructura, mejora de las condiciones de salud de los seres humanos al eliminar aguas estancadas que transmiten enfermedades relacionadas con el agua, e inclusive contribuye a mantener zonas de alimentación y humedales para la vida silvestre y las aves migratorias, así como para la recreación y la pesca.

En el 2007 Smedema elaboró una revisión de conferencias y talleres de la Comisión Internacional de Riego y Drenaje (ICID) y los comités de drenaje de la Sociedad Americana de Ingenieros Agrónomos y Biólogos (ASABE) para ver los avances que se tenían sobre el drenaje, y concluyó que en las últimas décadas se ha avanzado considerablemente en la mejora del diseño y la gestión de los sistemas de riego; sin embargo, se ha dedicado poca investigación al diseño y la aplicación de sistemas mejorados y a la gestión integrada de los sistemas de drenaje subterráneo. Strock et al. (2018) agregan que el mayor desafío en el diseño y la gestión del sistema de drenaje es reducir los impactos aguas abajo de estos sistemas.

Entre los dos sistemas mencionados anteriormente, se reconoce que los sistemas de drenaje subterráneos son más eficientes que los superficiales (Mendoza Palacios et al., 2003) y que estos sistemas no deben eliminar el agua que pueda contribuir al crecimiento de los cultivos más allá del punto necesario es decir provocar sobredrenaje (Ayars y Evans, 2015).

De acuerdo a Ritzema, citado Darzi-Naftchally, Majid Miriatifi, y Asgari (2014) los dos tipos básicos de ecuaciones empleadas para determinar el espaciamiento de drenaje parcelario son: de estado permanente y de estado transitorio. Cuando se utilizan las ecuaciones de estado permanente, la descarga de drenaje de diseño se considera igual que la recarga neta promedio a través del tiempo y, en consecuencia, el nivel freático permanece constante en el tiempo (Donnan, Hoogoudt y Ernst). En áreas irrigadas o con precipitaciones muy variables, estas suposiciones no se cumplen y las ecuaciones del estado transitorio son a veces más apropiadas (Glover-Dumm y Kraijenhoff).

El método transitorio es el principal procedimiento utilizado para diseñar sistemas de drenaje en áreas irrigadas y los parámetros requeridos son: la topografía de la superficie, la geología, el tipo de suelo, las propiedades hidráulicas del suelo, la salinidad, las pérdidas por percolación profunda (irrigación, lluvia), el flujo lateral subterráneo y la escorrentía superficial (USBR, 1993).

Tanto en los procedimientos de diseño de estado estacionario como en los transitorios, la profundidad y el espaciamiento lateral del drenaje se revisan mediante un proceso iterativo hasta que se cumplen los criterios de diseño (Ayars y Evans, 2015) y aunque existen modelos computarizados (Skaggs y Gilliam, 1986; van der Ploeg, Horton, y Kirkham, 1999) se requiere un usuario experimentado e información estadística para usarlos (Leij, Toride, y Tseng 1999; Ayars y Evans, 2015).

Tanto la obtención de parámetros utilizados en el diseño, así como los procedimientos de cálculo provocan diseños deficientes. Una solución común a un diseño deficiente instalado en campo es reducir el espacio lateral mediante la instalación de un lateral adicional entre dos existentes, lo cual es una situación menos que ideal debido al costo y la pérdida de productividad debido a la saturación de agua y la salinización antes de proporcionar un drenaje adecuado. Mehdinejadani, Naseri, Jafari, Ghanbarzadeh y Baleanu (2013) realizaron una evaluación experimental con dos modelos matemáticos en régimen transitorio, usando Glover-Dumm y un modelo desarrollado a partir de una ecuación fraccional unidimensional de Boussinesq (Chávez, Fuentes y Zavala, 2010) para

predecir el perfil de la capa freática entres dos drenes subterráneos; encontraron que el modelo fraccionario en suelos homogéneos se reduce al modelo matemático de Glover-Dumm, y en suelos heterogéneos tiene mejor predicción el modelo de Boussinesq.

El método de Kraijenhoff Van de Leur-Maasland se utiliza para la determinación de la separación de drenajes en estado de flujo no permanente. Al igual que otros métodos utilizados para este propósito, éste también asume que la carga sobre los drenes es variable en el tiempo, por lo tanto, la recarga del drenaje es variable en el tiempo también. La profundidad de la capa freática oscila debido a una variación de almacenamiento de agua en el suelo, debido a una desigualdad entre la recarga y el agua drenada, por lo que se producen velocidades de flujo distintas en cada punto de la sección transversal. De hecho, este método no es muy práctico para la determinación de la distancia de drenaje; sin embargo, es muy útil para el análisis de la oscilación de la profundidad de la capa freática y la variación de la velocidad de descarga del drenaje como consecuencia de la recarga. Además de sus ventajas, este en estado de flujo transitorio, en diferentes circunstancias tiene algunas peculiaridades, que podría considerarse como una limitación en su aplicación. (Djurovic y Stricevic, 2003).

En el presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un modelo físico para medir la variación del perfil de agua en un suelo saturado con dos estratos de suelo con diferentes propiedades físicas y compararlos con los calculados con las ecuaciones de Glover-Dumm y Kraijenhoff Van de Leur-Maasland utilizadas en el cálculo de la separación de drenes subterráneos parcelarios.

4.4 Materiales y métodos

4.4.1 Localización

El experimento se construyó en las instalaciones del campo experimental Tlapeaxco del Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo. El suelo para el experimento de laboratorio se obtuvo del Perfil Pedológico 2, excavado en del predio “La Cerona” (Figura 19). Del diagnóstico previo se identificó problema de anegamiento ocasionado por las pérdidas de

infiltración y percolación profunda del riego superficial que elevan el NF en este predio, motivo por el cual se extrae suelo de esta área.

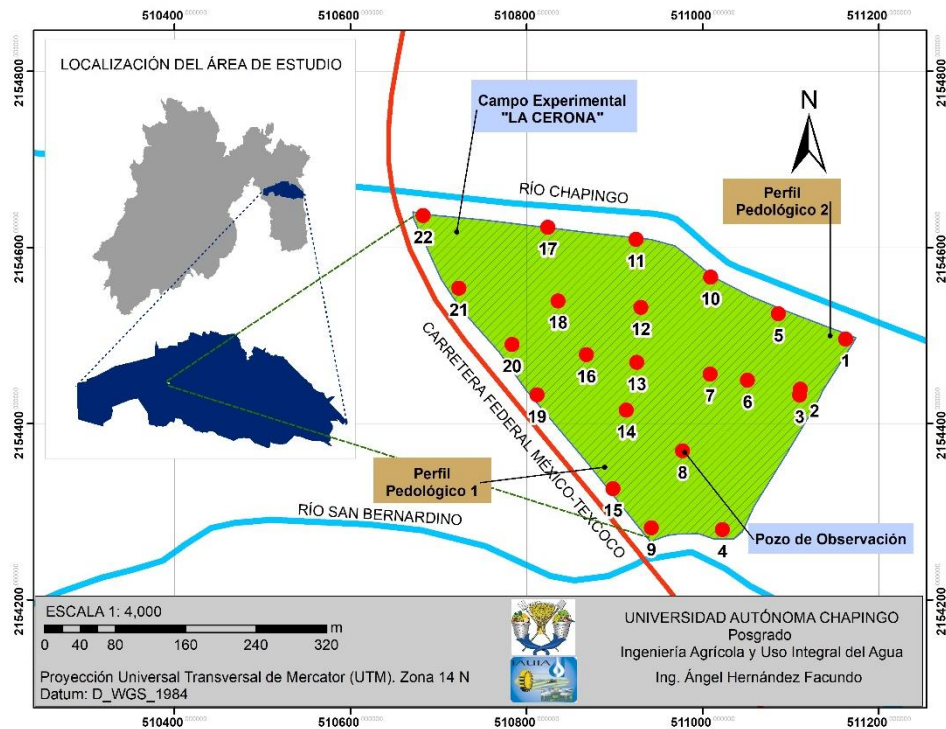


Figura 19. Localización de perfiles pedológicos

4.4.2 Suelo

El perfil pedológico se ubicó dentro del área de cultivo, a 4 metros del pozo de observación 01 (Figura 20) y se excavó hasta una profundidad de 1.83 metros.



Figura 20. Perfil pedológico junto a PO 01

Se realizó una clasificación de campo diferenciando color y grado de compactación con la cual se identificaron 5 estratos de suelo; El estrato uno de espesor 0.5 m, color café oscuro y compactación dura; el estrato dos de 0.18 m de espesor, color café oscuro y compactación media; el estrato tres de 0.18 m de espesor color café claro y compactación media; el estrato cuatro de 0.47 m de espesor, color café oscuro, suelo húmedo y compactación dura; el estrato cinco se excavó únicamente 0.5 m, el color se identificó café oscuro, suelo muy húmedo y compactación suave. Se tomaron muestras obtener las características físicas en laboratorio.

El suelo que se utilizó en el modelo físico se extrajo del estrato cuatro y cinco, para ello se excavó hasta una profundidad de 0.83 m un área de 3.0x1.5 metros en la cara este del perfil pedológico (Figura 21).



Figura 21. Excavación hasta el estrato cuatro.

Se removió el suelo y se colocó sobre un plástico a la intemperie para retirar la humedad, el tiempo aproximado de secado fue de 48 horas o hasta identificar el suelo completamente seco. Este suelo se tamizó en una malla de 1.2 mm de abertura y se pesó con una báscula tipo romana con precisión de 0.5 kg, para posteriormente ser almacenada en bolsas de polipropileno en cantidades de 25 a 35 kg cada uno. Del estrato cuatro se extrajeron 1,760 kg y del estrato cinco 2,105 kg que se trasladaron hasta el área donde se construyó el modelo físico.

4.4.3 Modelo físico

El modelo físico se construyó con una estructura desarmable de aluminio de 2.44 m de largo, 1.24 m de ancho y 1.24 m de altura, se colocó el acrílico en la parte interna de la estructura y se sujetó con tornillos y arandelas a cada 0.3 m, en las caras de mayor longitud se colocaron dos soportes verticales a cada 81 cm y en las caras pequeñas únicamente se colocaron soportes en la parte media. Entre el acrílico y la estructura de aluminio se introdujo una solera de polímero, así mismo se colocó silicón adhesivo en la parte interna entre las uniones de las láminas de acrílico con la finalidad de impedir filtraciones de agua (Figura 22).



Figura 22. Estructura del modelo físico

Antes de llenar el contenedor de suelo se realizó la instalación de los pozos de observación y los piezómetros dentro del modelo (Figura 23). Los pozos de observación consisten en tubos de PVC de 3 cm de diámetro interior, con 8 líneas de orificios de 5mm a cada 2 cm, distribuidos de manera uniforme en toda la pared del tubo, se cubrió con una malla de polietileno de 1.35 mm de abertura y sobre esta malla se colocó otra malla de 0.8x0.6 mm de abertura debido a que la primera malla seguía permitiendo el ingreso de partículas finas. Se instalaron en el centro del contenedor paralelos a la cara más grande, el primer tubo se instaló a 45 cm de la pared del acrílico y posteriormente a separaciones 11, 17, 25.6, 23.3, 23.3, 25.6, 27 y 11 cm, de tal manera que se pudieran tomar puntos de todo el perfil del agua.

Los piezómetros se instalaron de tubos transparentes de 12 mm de diámetro conectados desde la parte inferior de los pozos de observación hasta la parte externa del contenedor.



Figura 23. Instalación de Pozos de Observación y piezómetros

La compactación del suelo dentro del contenedor se realizó de manera uniforme utilizando un apisonador de madera con peso de 3 kg. Para el estrato cuatro se agregaban 70 kg de suelo que se distribuía en toda la superficie del contenedor y se compactaba hasta alcanzar una altura de 1.9 cm calculado a partir del área de 2.44 x 1.24 m de la estructura y la densidad de 1.22 kg cm^{-3} del suelo. Para el estrato cinco la misma masa requería una altura de 1.6 cm pues la densidad de 1.46 kg cm^{-3} es mayor (Figura 24).



Figura 24. Compactación de suelo

La altura del estrato cinco fue de 49 cm y la del estrato cuatro de 41 cm, formando un perfil de suelo con dos estratos de 90 cm de profundidad. Los drenes se colocaron a 25 cm de la base y a 50 cm de la pared lateral, quedando ubicados en el estrato cinco, y la separación entre ellos fue de 1.40 m con pendiente de 1%, su ubicación de acuerdo a los pozos de observación para el primer dren es a 7 cm del pozo uno y 4 cm del pozo dos y para el segundo dren es 4 cm del pozo ocho y 7 cm del pozo 9 (Figura 25).

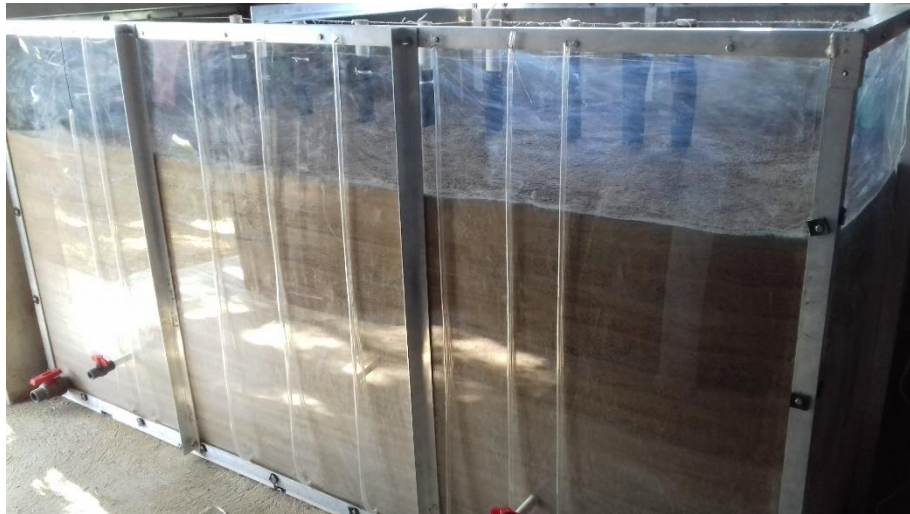


Figura 25. Ubicación de drenes, pozos de observación y piezómetros

Los tubos de drenaje se perforaron de manera manual siguiendo las recomendaciones de la FAO (2009) que proponen orificios de 0.6 a 2 mm, distribuidos uniformemente en la pared de la tubería, por lo menos en cuatro filas con un mínimo en cada fila de dos perforaciones cada 100 mm, dado lo anterior se hicieron perforaciones de 1.6 mm a cada 2 cm en seis hileras de la pared del tubo (Figura 26) y se cubrió con una primera malla de polietileno de 1.35 mm de abertura y una segunda malla de 0.8x0.6 mm de abertura.

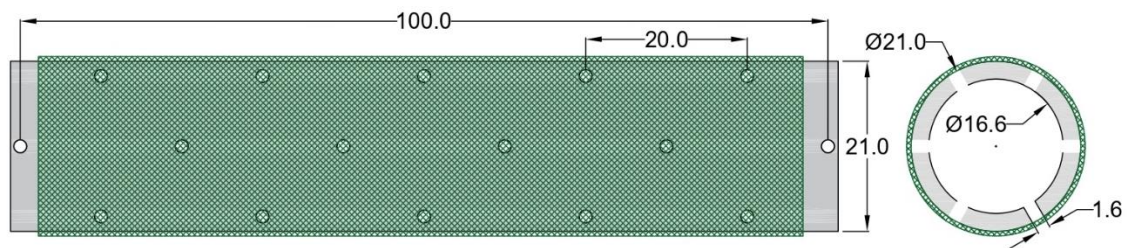


Figura 26. Características del tubo de drenaje, acotaciones en mm

El contenido de humedad del estrato cuatro se midió con un TDR 300 con barras de 20 cm y resultó de 7%. Para la saturación del perfil del suelo se instalaron dos tubos de manera vertical de 10 cm de diámetro en los 90 cm de suelo con orificios de 5 mm a cada 4 cm en 10 hileras, estos tubos se ubicaron en la parte posterior del modelo conectados entre sí con codos de 90°, para agregar agua se realizó la conexión a un contenedor de 200 litros colocado en el techo, el agua se distribuía por gravedad en cada uno de los tubos y llegaba al suelo a través de los orificios, de esta manera se inició con la saturación del suelo (Figura 27).



Figura 27. Suelo saturado

4.4.4 Conductividad hidráulica

Para obtener la conductividad hidráulica se usó el método del pozo barrenado y el descenso del agua se midió con una sonda HOB0 MX2001, con precisión de 3 mm y rango de respuesta de 1 s a temperatura estable (Figura 29).



Figura 28. Pozos para medir la conductividad hidráulica

4.4.5 Modelo matemático

Se calculó el perfil de agua utilizando las ecuaciones de régimen transitorio de Glover-Dumm. Se considera una recarga hasta la superficie del suelo y posteriormente un descenso ocasionado por los drenes.

$$L^2 = \frac{\pi^2 kD t}{\mu \ln \left(1.16 \frac{h_0}{h_t} \right)}$$

Donde: L = espaciamiento entre drenes (m); kD = transmisibilidad (m²d⁻¹); t = tiempo (días); μ = macroporosidad (adimensional); h₀ = altura máxima del NF sobre los drenes (m); h_t = altura mínima del NF sobre los drenes (m).

Para calcular la posición de la carga hidráulica h con respecto a la posición y al tiempo se utiliza la siguiente ecuación:

$$h(x, t) = \frac{4h_0}{\pi} \sum_{n=1, -3, 5, -7, \dots} \frac{1}{n} e^{-n^2 \alpha t} \operatorname{sen} \left(\frac{n\pi x}{L} \right) \quad (8)$$

El factor de reacción α se calcula de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{\pi kD}{\mu L^2} \quad (9)$$

Para la evaluación del modelo matemático se obtienen los siguientes parámetros estadísticos

Máximo error

$$ME = \operatorname{Max} |h_i - h'_i|_{i=1}^n \quad (10)$$

Raíz del error cuadrático medio (RMSE)

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (h'_i - h_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{100}{\bar{h}} \quad (11)$$

Coficiente residual de masa (CRM)

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^N h'_i - \sum_{i=1}^N h_i}{\sum_{i=1}^N h_i} \quad (12)$$

Coficiente de determinación (CD)

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2}{\sum_{i=1}^N (h'_i - \bar{h})^2} \quad (13)$$

Eficiencia del modelo (EF)

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2 - \sum_{i=1}^N (h'_i - h_i)^2}{\sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2} \quad (14)$$

Donde h_i son los valores observados, h'_i son los valores simulados, \bar{h} es la media de los datos observados, y N es el número de puntos de datos de observación.

4.5 Resultados y discusión

Se midió la variación de agua dentro de un pozo de 10.4 cm de diámetro, el descenso se registró de manera automática con la sonda HOBO MX2001, en la Figura 29 se muestra el descenso del agua en el estrato cuatro y en la Figura 30 se muestra el descenso del agua en el estrato 2. Las conductividades resultan de 0.4057 y 0.0928 m d⁻¹.

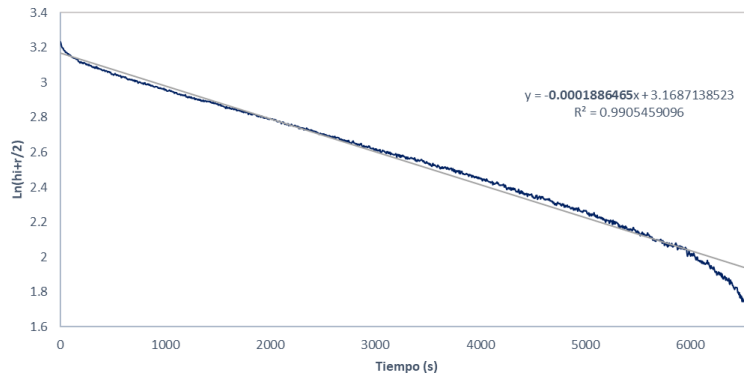


Figura 29. Descenso del agua en el estrato cuatro.

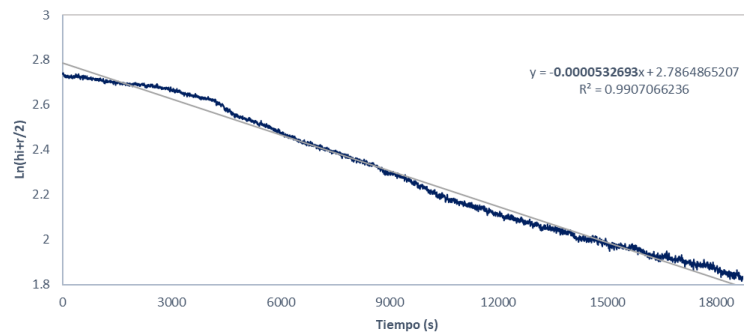


Figura 30. Descenso el agua en el estrato cinco.

Las características físicas del suelo que se utilizó en el modelo se muestran en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Características de los suelos en el modelo.

Estrato	Espesor (m)	Textura	θ_{cc} (%)	θ_s (%)	K (md^{-1})	μ (adim)	Da (gcm^{-3})
4	0.49	Franca	37.25	57.51	0.4057	0.2026	1.22
5	0.40	Franca	31.87	46.76	0.0928	0.1489	1.46

Los dos estratos utilizados son de textura Franca, el estrato cuatro tiene un 26.36% de arcilla y el estrato cinco un 22.36%. Debido a la densidad aparente el estrato cinco se compactó un 20% más que el estrato cuatro, por tal motivo resultó una conductividad hidráulica de 0.0928 m d^{-1} teniendo una diferencia de 0.3129 respecto a la conductividad hidráulica del estrato cuatro. La Macroporosidad se obtiene con la diferencia entre la humedad a capacidad de campo y saturación, estos datos se obtuvieron en laboratorio.

Para observar el descenso del perfil del agua en el modelo se abrieron las válvulas de los drenes y se tomaron las observaciones a cada 5 minutos de 0 a 2 horas (Figura 31 y Figura 32), cada 10 minutos de la hora 2 a 3 (Figura 33) y cada 30 min de la hora 3 a 4, posteriormente se tomaron lecturas en la hora 5, 7, 10, 11, 12, 14, 16 y 17 (Figura 34).

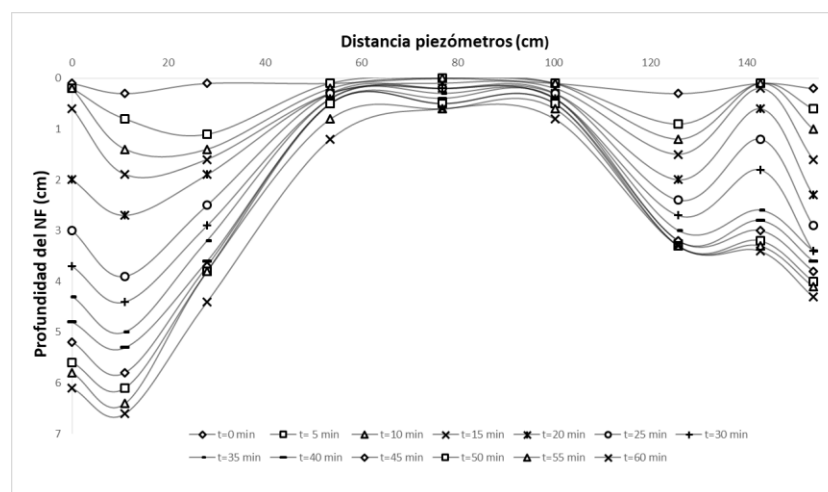


Figura 31. Profundidad del perfil de agua en la primera hora con observaciones registradas a cada 5 minutos.

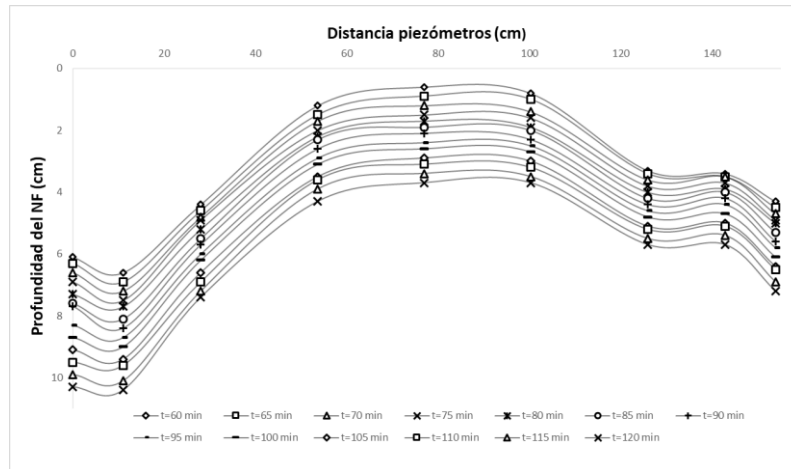


Figura 32. Profundidades del perfil de agua en la segunda hora con observaciones registradas a cada 5 minutos.

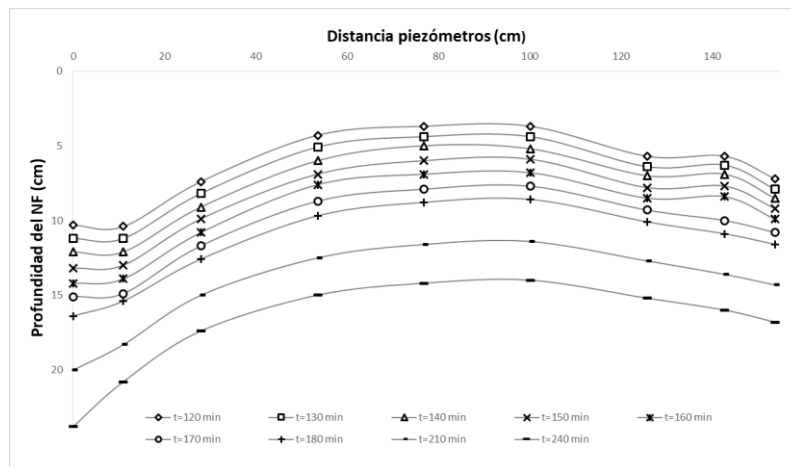


Figura 33. Profundidades del perfil de agua en la tercera y cuarta hora, con observaciones a cada 10 y 30 minutos respectivamente.

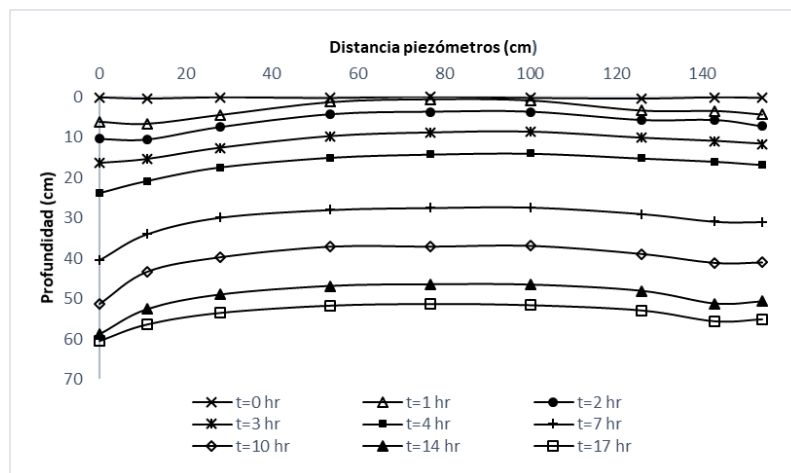


Figura 34. Perfiles de agua observados

Los volúmenes en cada dren se midieron con una probeta de 2 litros, graduada a cada 20 ml, se midieron al mismo tiempo que los piezómetros y resultó un volumen de 44.42 litros para el dren 1 y 42.3 litros para el dren 2 (Figura 35). Hasta los 200 minutos el volumen se presentó constante posteriormente disminuyó considerablemente debido a la carga sobre los drenes. En el dren 1 siempre se obtuvo mayor gasto, esta variación también se reflejó en la carga sobre los drenes.

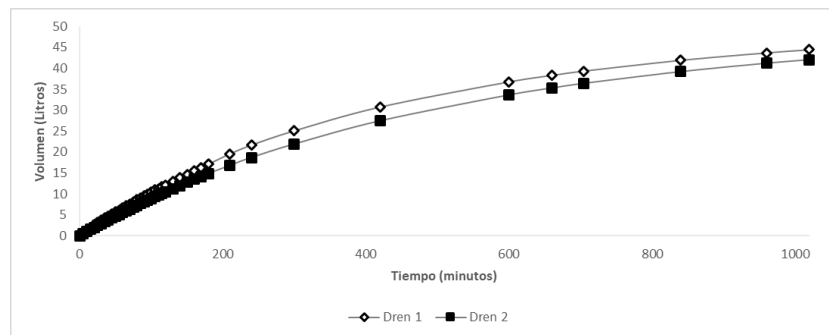
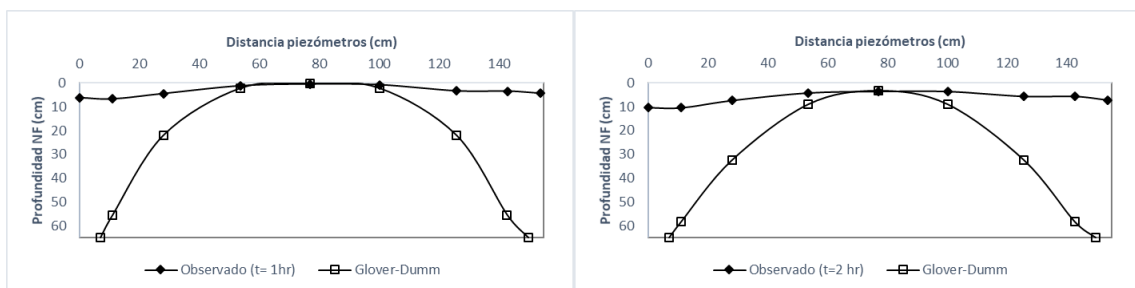


Figura 35. Volumen de agua acumulado del dren 1 y 2 en el modelo.

El perfil de agua se midió en los nueve piezómetros, la comparación de los datos observados con los calculados a partir de la ecuación para régimen transitorio de Glover-Dumm se realizó en los tiempos $t= 1, 2, 3, 4, 7, 10, 14$ y 17 horas. El análisis se inicio en el descenso del nivel freático, para posteriormente calcular las cargas con respecto a cada uno de los tiempos y respecto a la separación de los piezómetros tomando al dren 1 como origen.

En la Figura 36 se presentan los datos observados y los calculados con Glover-Dumm. Es importante mencionar que este modelo matemático asume que existe una recarga instantanea que provoca un ascenso, sin embargo, en el descenso la carga sobre el dren siempre se considera igual a cero.



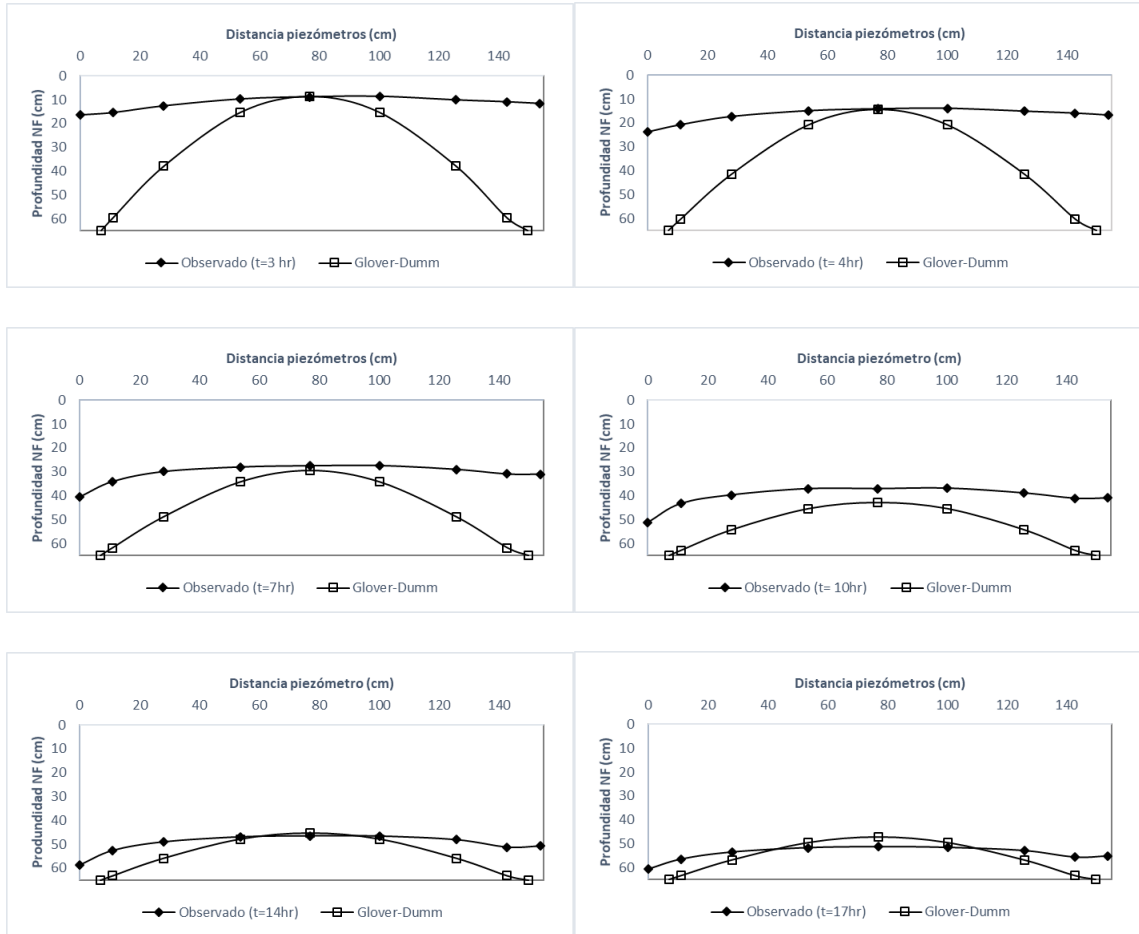


Figura 36. Profundidades del perfil de agua en los tiempos 1, 2, 3, 4, 7, 10, 14 y 17 horas después de abrir los drenes.

Los resultados del análisis estadístico se muestran en el Cuadro 8. El máximo error (ME) siempre se obtuvo en las proximidades del dren y el valor de 52.63 cm se obtuvo para $t= 2\text{hr}$ ocasionado por el menor volumen que resultó del dren dos y provocaba un descenso del perfil del agua más lento que el dren uno. Esta diferencia entre valores observados y calculados que resultaron tan grandes cerca de los drenes provocó valores de 996.39% a 155.19% en la raíz del cuadrado medio del error en las primeras 4 horas. Para $t= 7\text{hr}$ los valores disminuyeron y fueron menores de 100%, llegando a un porcentaje de 9.02% para $t= 17\text{hr}$. El coeficiente residual de masa obtuvo valores aceptables, puesto que valores cercanos a cero indican mayor precisión en el modelo. El coeficiente de determinación indica que el modelo de Glover-Dumm está muy alejado de

predecir los valores observados, sin embargo, si se analizara únicamente los valores a la mitad del dren, esta tendría valores cercanos a uno, indicando buena su precisión. La eficiencia del modelo siempre resulta negativo si las diferencia entre los datos observados y calculados es grande, si este coeficiente es cercano a cero entonces se tiene buena predicción, para nuestro caso el valor llegó a menos 10.99.

Cuadro 8. Datos estadísticos entre lo observado y lo calculado con Glover-Dumm.

	1 hr	2 hr	3 hr	4 hr	7 hr	10 hr	14 hr	17 hr
ME (cm)	52.21	52.63	48.66	43.56	30.91	21.74	11.99	7.78
RMSE (%)	996.39	519.49	264.67	155.19	64.96	37.05	14.87	9.02
CRM	0.87	0.80	0.67	0.52	0.35	0.25	0.10	0.04
CD	0.005	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.06	0.08
EF	-213.06	-198.52	-177.61	-140.42	-85.51	-46.80	-14.56	-10.99

4.6 Conclusiones

Los coeficientes indican que el modelo es más preciso para $t=17\text{hr}$ con un 7.78 cm como máxima diferencia entre datos observados y un 9.02% de la raíz del error cuadrático medio. Si se comparan estos valores con los obtenidos por Mehdinejadani (2013), que evaluó dos modelos matemáticos en un suelo homogéneo, la cual obtuvo un 7.24 cm de diferencia entre sus datos y un 5.09% de la raíz del error cuadrático medio, resultan muy cercanos.

Glover-Dumm considera que la carga sobre el dren siempre es cero, por lo tanto, al tomar los valores cercanos al dren, la raíz del valor cuadrático medio para $t=1\text{hr}$ resulta de 996.39%, esto significa que para un suelo con dos estratos se debe considerar este efecto de carga sobre el dren, pues en este punto los valores se alejan a lo observado.

La conductividad hidráulica del estrato cuatro en campo fue de 0.2046 m d^{-1} y del estrato cinco de 0.1326 m d^{-1} en el modelo resultó de 0.4057 m d^{-1} y de 0.0928 m d^{-1} respectivamente, para el estrato cuatro aumentó debido a que se compactó menos que el estrato cinco.

Agradecimientos

El autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico para realizar este trabajo. Al Dr. Jorge Victor Prado Hernández por el asesoramiento y guía brindada, así como al Dr. Mauricio Carrillo García y Dr. Agustín Ruíz García.

Literatura citada

- Ayars, J. E., Christen, E. W., & Hornbuckle, J. W. (2006). Controlled drainage for improved water management in arid regions irrigated agriculture. *Agricultural Water Management*, 86(1–2), 128–139. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.07.004>
- Ayars, James E., & Evans, R. G. (2015). Subsurface Drainage - What's Next? *Irrigation and Drainage*, 64(3), 378–392. <https://doi.org/10.1002/ird.1893>
- Bahçeci, I., Nacar, A. S., Topalhasan, L., Tari, A. F., & Ritzema, H. P. (2018). A New Drainpipe-Envelope Concept for Subsurface Drainage Systems in Irrigated Agriculture. *Irrigation and Drainage*, 67(May), 40–50. <https://doi.org/10.1002/ird.2247>
- Breemen, N. Van, & Buurman, P. (2003). Soil Formation. In *Soil Formation* (2th ed.).
- Chávez, C., Fuentes, C., & Zavala, M. (2010). Solución en diferencias finitas de la ecuación de Boussinesq del drenaje agrícola con porosidad drenable variable y sujeta a una condición de radiación fractal. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 1(4), 105–117.
- CONAGUA. (2018). *Estadísticas del Agua en México* (2018th ed.). http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/eam_2018.pdf
- Coras Merino, P. M., Ontiveros Capurata, R., & Diakite Diakite, L. (2014). Movimiento del agua freática y concentración de sales en suelos agrícolas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(4), 537–548. <https://doi.org/10.29312/remexca.v5i4.917>
- Darzi-Naftchally, A., Majid Miriatifi, S., & Asgari, A. (2014). Comparison of steady- and unsteady-state drainage equations for determination of subsurface drain spacing in paddy fields : a case study in Northern Iran. *Paddy Water Environ*, 12, 103–111. <https://doi.org/10.1007/s10333-013-0364-4>
- Djurovic, N., & Stricevic, R. (2003). Application of Kraijenhoff Van de Leur - Maasland's method in drainage. *Journal of Agricultural Sciences, Belgrade*, 48(2), 159–170. <https://doi.org/10.2298/jas0302159d>

- Dregne, H. E. (2019). Soils of semiarid regions. In *In Natural Resources and Development in Arid Regions*. <https://doi.org/10.4324/9780429049378-5>
- Foth, H. D. (1990). *Fundamentals of soil science* (J. Wiley (ed.); 8th ed.).
- Hillel, D. (1998). Environmental Soil Physics. In *Environmental Soil Physics*.
- Hornbuckle, J. W., Christen, E. W., & Faulkner, R. D. (2007). Evaluating a multi-level subsurface drainage system for improved drainage water quality. *Agricultural Water Management*, 89(3), 208–216. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.01.004>
- IMTA. (1986). *Manual de drenaje de zonas tropicales*. <http://hdl.handle.net/20.500.12013/966>
- Inegi. (2019). *Encuesta Nacional Agropecuaria*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ena/2019/doc/irg_ena2019.pdf
- Jiménez, J. de la C., Moreno, L. P., & Magnitskiy, S. (2012). Respuesta de las plantas a estres por inundacion. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 6(1), 96–109.
- Kirkham, M. B. (2005). Principles of Soil and Plant Water Relations. In Elsevier (Ed.), *Principles of Soil and Plant Water Relations* (6th ed.).
- Koorevaar, P., Menelik, G., & Dirksen, C. (1983). Elements of soil physics. In *Elements of soil physics*. <https://doi.org/10.1097/00010694-198510000-00012>
- Leij, F. J., Toride, N., & Tseng, P.-H. (1999). Alternative Approaches for Modeling Solute Transport. *Agronomy Monograph*, 12(38), 431–465. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr38.c12>
- Malota, M., & Senzanje, A. (2016). A diagnosis of sub-surface water table dynamics in low hydraulic conductivity soils in the sugar cane fields of Pongola, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, 92, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.10.004>
- Mehdinejadi, B., Naseri, A. A., Jafari, H., Ghanbarzadeh, A., & Baleanu, D. (2013). A mathematical model for simulation of a water table profile between two parallel subsurface drains using fractional derivatives. *Computers and Mathematics with Applications*, 66(5), 785–794. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2013.01.002>
- Mendoza Palacios, J. de D., Nikolskii Gavrillov, I., Landeros Sánchez, C., Palma López, D. J., Carrillo Ávila, E., & Estrada Botello, M. (2003). Análisis del funcionamiento hidráulico de diferentes tipos de drenaje agrícola en Tabasco, Mexico. *Ingeniería Hidráulica En México*, XVIII(2), 107–119.
- Mercado Fernández, T., Ortega Escobar, M., Arenas Tawil, A., & Combatt Caballero, E. (2011). Dinámica de sales en el distrito de riego La Doctrina,

- Colombia. *Idesia (Chile)*, 29(1), 83–90. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292011000100011>
- Morgan, R. P. C. (2005). Soil Erosión & Conservation. In Blackwell (Ed.), *Soil Erosión & Conservation* (3th ed.).
- Muñoz Ruiz, C., & León Quirós, J. (2016). El rol del nivel freático en el rendimiento del banano (*Musa AAA*) clon gran enano. *Tecnología En Marcha*, 15(3), 18–24.
- Namuche Vargas, J. R., Olvera Salgado, M. D., Saucedo Rojas, H. E., Fuentes Ruíz, C., & Arellano Monterrosas, J. L. (2020). Desarrollo y evolución del drenaje agrícola en México. *Revista Ingeniería Agrícola*, 9(4), 1–26.
- Ortega Corrales, L. J. (1996). *Diagnostico y consecuencias del mal drenaje en el sur de Chile. Proyecto: Estudio de Investigación y Validación de Tecnología de Drenaje en las IX-X-XI Regiones.*
- Oyarce, P., Gurovich, L., & Duarte, V. (2017). Experimental evaluation of agricultural drains. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(4), 1–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001134](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001134)
- Pachas, R. (2009). El levantamiento topográfico: Uso del GPS y estación total. *ACADEMIA -Trujillo-Venezuela*, 8(16), 29–45. <http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/30397/1/articulo3.pdf>
- Rattan, L., & Manoj, K. S. (2004). Principles of Soil Physics. In *Books in soils, plants and the environment*. <https://doi.org/10.2136/vzj2004.0012br>
- Rimidis, A., & Dierickx, W. (2004). Field research on the performance of various drainage materials in Lithuania. *Agricultural Water Management*, 68(2), 151–175. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.03.004>
- Scheumann, W., & Freisem, C. (2002). The role of drainage for sustainable agriculture. *Journal of Applied Irrigation Science*, 37(1), 33–61.
- Seiler, K. P., & Gat, J. R. (2007). Groundwater recharge from run-off, infiltration and percolation. In *Water Science and Technology Library*. <https://doi.org/10.1007/0-306-48065-4>
- Serrano-coronel, G., Chipana-rivera, R., Moreno-pérez, M. F., & Roldán-Cañas, J. (2018). Study of vertical water flows contribution to the crop water consumption in suka kollus using a mixed drainage system. *Agricultural Water Management*, 206, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.05.003>
- Smedema, L. K. (2007). Nine international drainage workshop: history, objectives, content and reflections on significance and impacts. *Irrigation and Drainage*, 56, 23–34. <https://doi.org/10.1002/ird.341>
- Smith, K. A., & Mullins, C. E. (2000). Soil and Environmental. In *Physical Methods* (2th ed.). <https://doi.org/10.1081/e-ess3-120042638>

- Strock, J. S., Hay, C. H., Helmers, M. J., Nelson, K. A., Sands, G. R., Skaggs, R. W., & Douglas-Mankin, K. R. (2018). Advances in drainage: Selected works from the Tenth international drainage symposium. *Transactions of the ASABE*, 61(1), 161–168. <https://doi.org/10.13031/trans.12668>
- USBR (United States Bureau of Reclamation). (1993). *Drainage Manual: A Water Resources Technical Publication*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- van der Ploeg, R. R., Horton, R., & Kirkham, D. (1999). *Steady Flow to Drains and Wells* (Issue 38). <https://doi.org/10.2134/agronmonogr38.c6>
- Zambrano, F., Villafaña, R., & Figueroa, R. (2003). Efecto De La Profundidad Del Nivel Freático Sobre La Producción De Tomate En Un Suelo Franco Arenoso Y Bajo Condiciones De Invernadero. *Agronomía Tropical*, 53(4), 22–31.

5 Propuesta de drenaje

Se plantea el diseño de drenaje subterráneo, considerando el cultivo de maíz y que la profundidad del NF 3 días después del riego deberá ser de 1.10 m para evitar afectaciones.

Determinación de la Recarga (**R**)

a) Lámina para llevar el suelo a θ_{cc} (L_a).

$$L_1 = (\theta_{cc} - \theta_{act})E_1 = \left(\frac{41.98 - 34.17}{100}\right) 0.30 = 0.02181 \text{ m}$$

$$L_2 = (\theta_{cc} - \theta_{act})E_2 = \left(\frac{17.34 - 14.64}{100}\right) 0.15 = 0.00405 \text{ m}$$

$$L_3 = (\theta_{cc} - \theta_{act})E_3 = \left(\frac{17.83 - 15.90}{100}\right) 0.30 = 0.00579 \text{ m}$$

$$L_4 = (\theta_{cc} - \theta_{act})E_4 = \left(\frac{15.81 - 13.26}{100}\right) 0.35 = 0.00893 \text{ m}$$

$$L_5 = (\theta_{cc} - \theta_{act})E_5 = \left(\frac{34.16 - 28.91}{100}\right) 3.9 = 0.20475 \text{ m}$$

$$L_a = \sum_{i=1}^5 L_i = 0.02181 + 0.00405 + 0.00579 + 0.00893 + 0.20475 \\ = 0.245 \text{ m}$$

b) Lámina aplicada (L_{apl})

$$L_{apl} = 0.296 \text{ m}$$

La recarga (**R**) se obtiene de la sustraer la lámina para llevar el suelo a capacidad de campo a la lámina aplicada.

$$R = L_{apl} - L_a = 0.296 - 0.245 = 0.051 \text{ m}$$

La lámina de exceso resultó de 5.1 cm, aplicada cada 18 días. Se consideran drenes colocados a una profundidad (PD) de 1.70 m, y tubo de 8 cm de diámetro con paredes corrugadas.

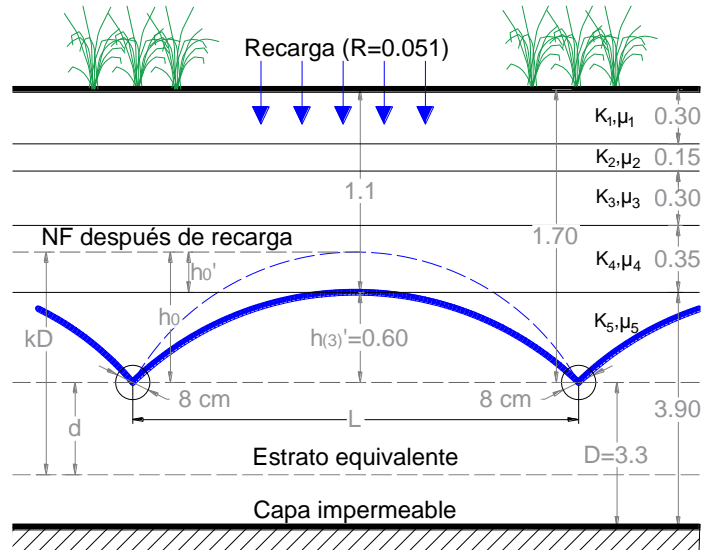


Figura 37. Diseño de drenaje "La Cerona"

Se inicia con $L = 21.5 \text{ m}$

$$R_H = \frac{(L - 1.4D)^2}{8DL} = \frac{(21.5 - 1.4(3.3))^2}{8(21.5)(3.3)} = 0.50200$$

$$R_r = \frac{1}{\pi} \ln \left(0.7 \frac{D}{r} \right) = \frac{1}{\pi} \ln \left(0.7 \frac{(3.3)}{(0.04)} \right) = 1.2911$$

$$d = \frac{L}{8(R_H + R_r)} = \frac{21.5}{8(0.448 + 1.2911)} = 1.49880$$

Riego 1

Asenso del Nivel Freático:

$$h_5 = PD - E_4 - E_3 - E_2 - E_1 = 0.6 \text{ m}$$

$$R = \mu h_5 = 0.0833(0.6) = 0.04998$$

$$R' = 0.051 - 0.04998 = 0.00102 \text{ m}$$

El NF se encuentra en el estrato 4. Se calcula la h_0' .

$$h_0' = \frac{R'}{\mu}$$

$$h_0' = \frac{0.00102}{0.1323} = 0.00771 \text{ m}$$

$$h_0 = 0.6 + 0.00771 = 0.60771 \text{ m}$$

Descenso del Nivel Freático:

Trasmisividad y factor de reacción en el estrato 4.

$$kD_{(4)} = k_4 \left(\frac{h_0'}{2} \right) + k_5 [(h_5) + d]$$

$$kD_{(4)} = 0.0898 \left(\frac{0.00771}{2} \right) + 0.2246 [(0.6) + 1.49880]$$

$$kD_{(4)} = 0.47174 \text{ m}^2 \text{d}^{-1}$$

$$\alpha_{(4)} = \frac{\pi^2 kD_{(4)}}{\mu_4 L^2} = \frac{\pi^2 (0.47174)}{0.1323 (21.5^2)} = 0.07613 \text{ d}^{-1}$$

Tiempo para ir de h_0 a h_5

$$t_{(4)} = \frac{1}{\alpha_{(1)}} \ln \left(1.16 \frac{h_0}{h_5} \right)$$

$$t_{(4)} = \frac{1}{0.07613} \ln \left(1.16 \frac{0.60771}{0.60} \right) = 2.12 \text{ d}$$

Se necesitan 2.12 días para que el NF llegue al estrato 5. Por lo que se calcula la trasmisividad y el factor de reacción en este estrato.

$$kD = k_5 \left(\frac{h_5}{2} + d \right)$$

$$kD_{(5)} = 0.2246 \left(\frac{0.6}{2} + 1.49880 \right) = 0.40401 \text{ m}^2 \text{d}^{-1}$$

$$\alpha_{(5)} = \frac{\pi^2 kD_{(5)}}{\mu_5 L^2} = \frac{\pi^2 (0.40401)}{0.0833 (21.5^2)} = 0.10355 \text{ d}^{-1}$$

Para calcular el NF a los 3 días de riego restamos los 2.12 días que ya han transcurrido para llegar al estrato 5.

$$t_{(3)} = 3 - 2.12 = 0.88$$

Como $\alpha_{(5)} t_{(3)} = (0.10355)(0.88) = 0.091124 < 0.45$, entonces;

$$h_{(3)} = 1.16 h_5 \sum_{n=1,3,5} \frac{1}{n} e^{-n^2 \alpha_{(5)} t_{(3)}}$$

Sustituyendo:

$$h_{(3)} = 1.16(0.6) \left(\frac{1}{1} e^{-(1)^2 (0.10355)(0.88)} - \frac{1}{3} e^{-(-3)^2 (0.10355)(0.88)} + \frac{1}{5} e^{-(5)^2 (0.10355)(0.88)} \right)$$

$$h_{(3)} = 0.5475 \text{ m}$$

Para que la separación de drenes sea el correcto $h_{(3)} = 0.5475 \text{ m}$ debe estar

dentro del siguiente intervalo $[h'_{(3)} - 0.025\text{m}] \leq h_{(3)} \leq [h'_{(3)} + 0.025\text{m}]$

$$[0.575 \text{ m}] \leq 0.5475 \text{ m} \leq [0.625 \text{ m}]$$

No se cumple condición, se revisa para los demás riegos.

El intervalo de riego es de 18 días, se calcula el remanente que será contemplado el riego 2.

$$t_{(15.88)} = 18 - 2.12 = 15.88$$

si, $\alpha_{(5)}t_{(15.88)} = (0.10355)(15.88) = 1.64437 > 0.45$, entonces;

$$h_{(16.11)} = 1.16 h_5 e^{-\alpha_{(5)}t_{(15.88)}}$$

$$h_{(15.88)} = 1.16(0.6)e^{-0.10355(15.888)} = 0.13442 \text{ m}$$

El remanente del riego 1 es 0.13442 m.

Riego 2

Asenso del nivel freático:

$$R = \mu h_5 = 0.0833(0.6 - 0.13442) = 0.038783$$

$$R' = 0.051 - 0.038783 = 0.012217 \text{ m}$$

El NF se encuentra en el estrato 4. Se calcula la h_0' .

$$h_0' = \frac{R}{\mu}$$

$$h_0' = \frac{0.012217}{0.1323} = 0.092343 \text{ m}$$

$$h_0 = 0.6 + 0.092343 = 0.692343 \text{ m}$$

Descenso del nivel freático:

Trasmisividad y factor de reacción en el estrato 4.

$$kD = k_4 \left(\frac{h_0'}{2} \right) + k_5 [(h_5) + d]$$

$$kD_{(4)} = 0.0898 \left(\frac{0.092343}{2} \right) + 0.2246 [(0.6) + 1.49880]$$

$$kD_{(4)} = 0.47554 \text{ m}^2 \text{d}^{-1}$$

$$\alpha_{(4)} = \frac{\pi^2 kD_{(4)}}{\mu_4 L^2} = \frac{\pi^2 (0.47554)}{0.1323 (21.5^2)} = 0.07674 \text{ d}^{-1}$$

Tiempo para ir de h_0 a h_5

$$t_{(4)} = \frac{1}{\alpha_{(1)}} \ln \left(1.16 \frac{h_0}{h_5} \right)$$

$$t_{(4)} = \frac{1}{0.07674} \ln \left(1.16 \frac{0.692343}{0.60} \right) = 3.8 \text{ d}$$

El NF 3 días después del riego se encuentra en el estrato 4. Se calcula $h_{(3)}$.

Como $\alpha_{(3)}t_{(3)} = (0.07674)(3) = 0.23022 < 0.45$, entonces;

$$h_{(3)} = 1.16 h_5 \sum_{n=1,-3,5} \frac{1}{n} e^{-n^2 \alpha_{(5)} t_{(3)}}$$

$$h_{(3)} = 1.16(0.692343) \left(\frac{1}{1} e^{-(1)^2(0.07674)(3)} - \frac{1}{3} e^{-(-3)^2(0.07674)(3)} + \frac{1}{5} e^{-(5)^2(0.07674)(3)} \right)$$

$$h_{(3)} = 0.6048 \text{ m}$$

Para que la separación de drenes sea el correcto $h_{(3)} = 0.6048 \text{ m}$ debe estar dentro del siguiente intervalo $[h'_{(3)} - 0.025\text{m}] \leq h_{(3)} \leq [h'_{(3)} + 0.025\text{m}]$

$$[0.575 \text{ m}] \leq 0.6048 \text{ m} \leq [0.625 \text{ m}]$$

Por lo tanto, se cumple condición. La separación de dren ($L = 21.5 \text{ m}$) satisface en el riego 2. Se calcula el remanente del segundo riego para ello determinamos la transmisividad y el factor de reacción en el estrato 5.

$$kD = k_5 \left(\frac{h_5}{2} + d \right)$$

$$kD_{(5)} = 0.2246 \left(\frac{0.6}{2} + 1.49880 \right) = 0.40401 \text{ m}^2 \text{d}^{-1}$$

$$\alpha_{(5)} = \frac{\pi^2 kD_{(5)}}{\mu_5 L^2} = \frac{\pi^2 (0.40401)}{0.0833(21.5^2)} = 0.10355 \text{ d}^{-1}$$

El tiempo para llegar al estrato 5 fue de 3.8 días, ahora solo calculamos lo que falta para llegar al intervalo de riego.

$$t_{(14.2)} = 18 - 3.8 = 14.2 \text{ d}$$

Como $\alpha_{(5)}t_{(3)} = (0.10355)(14.2) = 1.47041 > 0.45$, entonces;

$$h_{(14.2)} = 1.16 h_5 e^{-\alpha_{(5)}t_{(14.2)}}$$

$$h_{(14.2)} = 1.16(0.6)e^{-0.10355(14.2)}$$

$$h_{(14.2)} = 0.160 \text{ m}$$

El remanente después del segundo riego es de 0.160 metros. Se contempla al analizar el riego 3.

Riego 3

Asenso del nivel freático:

$$R = \mu h_5 = 0.0833(0.6 - 0.160) = 0.03665$$

$$R' = 0.051 - 0.03665 = 0.01435 \text{ m}$$

El nivel freático se encuentra en el estrato 4, se calcula h_0' .

$$h_0' = \frac{R}{\mu}$$

$$h_0' = \frac{0.01435}{0.1323} = 0.10847 \text{ m}$$

$$h_0 = 0.6 + 0.10847 = 0.70847 \text{ m}$$

Descenso del nivel freático:

Trasmisividad y factor de reacción en el estrato 4.

$$kD = k_4 \left(\frac{h_0'}{2} \right) + k_5 [(h_5) + d]$$

$$kD_{(4)} = 0.0898 \left(\frac{0.10847}{2} \right) + 0.2246 [(0.6) + 1.49880]$$

$$kD_{(4)} = 0.47625 \text{ m}^2 \text{d}^{-1}$$

$$\alpha_{(4)} = \frac{\pi^2 kD_{(4)}}{\mu_4 L^2} = \frac{\pi^2 (0.47625)}{0.1323 (21.5^2)} = 0.07686 \text{ d}^{-1}$$

Tiempo para ir de h_0 a h_5

$$t_{(4)} = \frac{1}{\alpha_{(1)}} \ln \left(1.16 \frac{h_0}{h_5} \right)$$

$$t_{(4)} = \frac{1}{0.07686} \ln \left(1.16 \frac{0.70847}{0.60} \right) = 4.1 \text{ d}$$

El NF 3 días después del riego se encuentra en el estrato 4. Se calcula $h_{(3)}$.

Como $\alpha_{(3)} t_{(3)} = (0.07686)(3) = 0.23058 < 0.45$, entonces;

$$h_{(3)} = 1.16 h_5 \sum_{n=1, -3, 5} \frac{1}{n} e^{-n^2 \alpha_{(5)} t_{(3)}}$$

$$h_{(3)} = 1.16 (0.70847) \left(\frac{1}{1} e^{-(1)^2 (0.07686)(3)} - \frac{1}{3} e^{-(-3)^2 (0.07686)(3)} + \frac{1}{5} e^{-(5)^2 (0.07686)(3)} \right)$$

$$h_{(3)} = 0.6187 \text{ m}$$

Para que la separación de drenes sea el correcto $h_{(3)} = 0.6187 \text{ m}$ debe estar

dentro del siguiente intervalo $[h'_{(3)} - 0.025 \text{ m}] \leq h_{(3)} \leq [h'_{(3)} + 0.025 \text{ m}]$

$$[0.575 \text{ m}] \leq 0.6187 \text{ m} \leq [0.625 \text{ m}]$$

Por lo tanto, se cumple condición. La separación de dren ($L = 21.5 \text{ m}$) satisface en el riego 3. Se calcula el remanente del tercer riego para ello determinamos la trasmisividad y el factor de reacción en el estrato 5.

$$kD = k_5 \left(\frac{h_5}{2} + d \right)$$

$$kD_{(5)} = 0.2246 \left(\frac{0.6}{2} + 1.49880 \right) = 0.40401 \text{ m}^2 \text{d}^{-1}$$

$$\alpha_{(5)} = \frac{\pi^2 kD_{(5)}}{\mu_5 L^2} = \frac{\pi^2 (0.40401)}{0.0833 (21.5^2)} = 0.10355 \text{ d}^{-1}$$

El tiempo para llegar al estrato 5 fue de 4.1 días, ahora solo calculamos lo que falta para llegar al intervalo de riego.

$$t_{(14.2)} = 18 - 4.1 = 13.9$$

Como $\alpha_{(5)} t_{(3)} = (0.10355)(13.9) = 1.439345 > 0.45$, entonces;

$$h_{(14.2)} = 1.16 h_5 e^{-\alpha_{(5)} t_{(14.2)}}$$

$$h_{(14.2)} = 1.16(0.6) e^{-0.10355(13.9)}$$

$$h_{(14.2)} = 0.165 \text{ m}$$

El remanente después del tercer riego es de 0.165 metros. Se contempla al analizar el riego 4.

Riego 4

Asenso del Nivel freático:

$$R = \mu h_5 = 0.0833(0.6 - 0.165) = 0.03624$$

$$R' = 0.051 - 0.03624 = 0.01476 \text{ m}$$

El nivel freático se encuentra en el estrato 4, se calcula h_0' .

$$h_0' = \frac{R}{\mu}$$

$$h_0' = \frac{0.01476}{0.1323} = 0.11157 \text{ m}$$

$$h_0 = 0.6 + 0.11157 = 0.71157 \text{ m}$$

Descenso del nivel freático:

Trasmisividad y factor de reacción en el estrato 4.

$$kD = k_4 \left(\frac{h_0'}{2} \right) + k_5 [(h_5) + d]$$

$$kD_{(4)} = 0.0898 \left(\frac{0.11157}{2} \right) + 0.2246 [(0.6) + 1.49880]$$

$$kD_{(4)} = 0.47640 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$$

$$\alpha_{(4)} = \frac{\pi^2 kD_{(4)}}{\mu_4 L^2} = \frac{\pi^2 (0.47625)}{0.1323 (21.5^2)} = 0.07688 \text{ d}^{-1}$$

Tiempo para ir de h_0 a h_5

$$t_{(4)} = \frac{1}{\alpha_{(1)}} \ln \left(1.16 \frac{h_0}{h_5} \right)$$

$$t_{(4)} = \frac{1}{0.07688} \ln \left(1.16 \frac{0.71157}{0.60} \right) = 4.15 \text{ d}$$

El NF 3 días después del riego se encuentra en el estrato 4. Se calcula $h_{(3)}$.

Como $\alpha_{(3)} t_{(3)} = (0.07688)(3) = 0.23064 < 0.45$, entonces;

$$h_{(3)} = 1.16 h_5 \sum_{n=1,-3,5} \frac{1}{n} e^{-n^2 \alpha_{(5)} t_{(3)}}$$

$$h_{(3)} = 1.16 (0.71157) \left(\frac{1}{1} e^{-(1)^2 (0.07688)(3)} - \frac{1}{3} e^{-(-3)^2 (0.07688)(3)} \right. \\ \left. + \frac{1}{5} e^{-(5)^2 (0.07688)(3)} \right)$$

$$h_{(3)} = 0.621 \text{ m}$$

Para que la separación de drenes sea el correcto $h_{(3)} = 0.621 \text{ m}$ debe estar

dentro del siguiente intervalo $[h'_{(3)} - 0.025 \text{ m}] \leq h_{(3)} \leq [h'_{(3)} + 0.025 \text{ m}]$

$$[0.575 \text{ m}] \leq 0.621 \text{ m} \leq [0.625 \text{ m}]$$

Por lo tanto, se cumple condición. La separación de dren ($L = 21.5 \text{ m}$) satisface en el riego 4. Se calcula el remanente del cuarto riego, para ello se determina la trasmisividad y el factor de reacción en el estrato 5.

$$kD = k_5 \left(\frac{h_5}{2} + d \right)$$

$$kD_{(5)} = 0.2246 \left(\frac{0.6}{2} + 1.49880 \right) = 0.40401 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$$

$$\alpha_{(5)} = \frac{\pi^2 kD_{(5)}}{\mu_5 L^2} = \frac{\pi^2 (0.40401)}{0.0833 (21.5^2)} = 0.10355 \text{ d}^{-1}$$

El tiempo para llegar al estrato 5 fue de 4.15 días, ahora solo calculamos lo que falta para llegar al intervalo de riego.

$$t_{(14.2)} = 18 - 4.15 = 13.85$$

Como $\alpha_{(5)} t_{(3)} = (0.10355)(13.85) = 1.434168 > 0.45$, entonces;

$$h_{(14.2)} = 1.16 h_5 e^{-\alpha_{(5)} t_{(14.2)}}$$

$$h_{(14.2)} = 1.16(0.6) e^{-0.10355(13.85)}$$

$$h_{(14.2)} = 0.166 \text{ m}$$

El remanente después del cuarto riego es de 0.166 metros. Se contempla al analizar el riego 5.

Riego 5

Asenso del nivel freático:

$$R = \mu h_5 = 0.0833(0.6 - 0.166) = 0.03615$$

$$R' = 0.051 - 0.03615 = 0.01485 \text{ m}$$

El nivel freático se encuentra en el estrato 4, se calcula h_0' .

$$h_4 = \frac{R}{\mu}$$

$$h_0' = \frac{0.01485}{0.1323} = 0.11225 \text{ m}$$

$$h_0 = 0.6 + 0.11157 = 0.71225 \text{ m}$$

Trasmisividad y factor de reacción en el estrato 4.

$$kD = k_4 \left(\frac{h_0'}{2} \right) + k_5 [(h_5) + d]$$

$$kD_{(4)} = 0.0898 \left(\frac{0.11225}{2} \right) + 0.2246 [(0.6) + 1.49880]$$

$$kD_{(4)} = 0.47643 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$$

$$\alpha_{(4)} = \frac{\pi^2 kD_{(4)}}{\mu_4 L^2} = \frac{\pi^2 (0.47643)}{0.1323 (21.5^2)} = 0.07689 \text{ d}^{-1}$$

Tiempo para ir de h_0 a h_5

$$t_{(4)} = \frac{1}{\alpha_{(1)}} \ln \left(1.16 \frac{h_0}{h_5} \right)$$

$$t_{(4)} = \frac{1}{0.07689} \ln \left(1.16 \frac{0.71225}{0.60} \right) = 4.16 \text{ d}$$

El NF 3 días después del riego se encuentra en el estrato 4. Se calcula $h_{(3)}$.
 Como $\alpha_{(3)}t_{(3)} = (0.07689)(3) = 0.23067 < 0.45$, entonces;

$$h_{(3)} = 1.16 h_5 \sum_{n=1,-3,5} \frac{1}{n} e^{-n^2 \alpha_{(5)} t_{(3)}}$$

$$h_{(3)} = 1.16(0.71225) \left(\frac{1}{1} e^{-(1)^2(0.07689)(3)} - \frac{1}{3} e^{-(-3)^2(0.07689)(3)} + \frac{1}{5} e^{-(5)^2(0.07689)(3)} \right)$$

$$h_{(3)} = 0.622 \text{ m}$$

Para que la separación de drenes sea el correcto $h_{(3)} = 0.622 \text{ m}$ debe estar dentro del siguiente intervalo $[h'_{(3)} - 0.025\text{m}] \leq h_{(3)} \leq [h'_{(3)} + 0.025\text{m}]$

$$[0.575 \text{ m}] \leq 0.622 \text{ m} \leq [0.625 \text{ m}]$$

Por lo tanto, se cumple condición. La separación de dren ($L = 21.5 \text{ m}$) satisface en el riego 5. Se calcula el remanente del cuarto riego, para ello se determina la trasmisividad y el factor de reacción en el estrato 5.

$$kD = k_5 \left(\frac{h_5}{2} + d \right)$$

$$kD_{(5)} = 0.2246 \left(\frac{0.6}{2} + 1.49880 \right) = 0.40401 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$$

$$\alpha_{(5)} = \frac{\pi^2 kD_{(5)}}{\mu_5 L^2} = \frac{\pi^2 (0.40401)}{0.0833(21.5^2)} = 0.10355 \text{ d}^{-1}$$

El tiempo para llegar al estrato 5 fue de 4.16 días, ahora solo calculamos lo que falta para llegar al intervalo de riego.

$$t_{(14.2)} = 18 - 4.16 = 13.84$$

Como $\alpha_{(5)}t_{(3)} = (0.10355)(13.84) = 1.433132 > 0.45$, entonces;

$$h_{(14.2)} = 1.16 h_5 e^{-\alpha_{(5)} t_{(14.2)}}$$

$$h_{(14.2)} = 1.16(0.6) e^{-0.10355(13.84)}$$

$$h_{(14.2)} = 0.166 \text{ m}$$

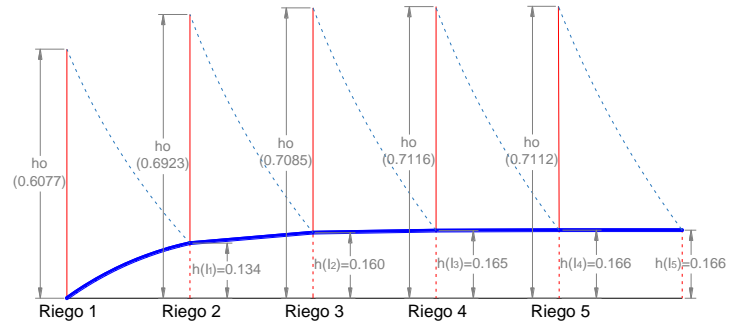


Figura 38. Comportamiento de Nivel freático en cada riego.

6 NEXOS

Mediciones del nivel freático en campo

No. P	24-jul-19	01-jul-19	08-jul-19	15-jul-19	22-jul-19	29-jul-19	05-ago-19	19-ago-19	26-ago-19	02-sep-19	09-sep-19	16-sep-19	19-sep-19	23-sep-19	30-sep-19	07-oct-19	14-oct-19
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	303.0	279.0	286.1	291.2	278.4	298.1
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	297.0	243.0	253.1	257.4	241.6	268.4
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	269.8	214.0	224.6	228.2	211.8	238.1
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	194.4
5	376.2	383.4	387.8	S/A	S/A	S/A	S/A	347.2	253.8	381.2	325.4	242.6	250.3	259.6	254.4	278.2	279.0
6	S/A	279.8	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	-	-	-	281.8	173.4	204.0	158.8	206.0	237.6	242.0
7	310.8	320.0	322.9	330.5	340	349	357.8	327	286	303.6	261.4	145.2	170.2	179.6	162.8	194.0	222.8
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	271.6	269.2	269.2	219.8	237.6	250.4
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	287.4	290.6	293.5	296.5	S/A	S/A	S/A	-	-	-	-	228.4	219.4	218.4	221.8	222.6	239.3
11	213.4	210.2	207	211.2	225	234.4	245	254.8	219.4	203.4	185.0	158.9	156.6	152.8	133.8	117.0	127.0
12	195.2	195.4	192.2	199.5	209.5	218	226.2	239.2	155.2	133.2	139.0	86.4	80.1	94.0	71.6	90.4	112.0
13	253.5	258.9	259	268	277.5	285.6	294	305.8	259.8	188.8	194.0	143.8	151.4	165.0	113.6	149.7	177.0
14	287.2	293.6	297	S/A	S/A	S/A	S/A	-	-	298.4	267.0	217.0	224.2	231.0	180.0	201.4	220.0
15	340.5	340.2	342.2	345.5	350	354.6	359.4	367.8	368.8	369.2	362.2	330.6	324.3	320.6	299.0	276.4	275.6
16	220.5	222.6	220.5	232.5	241.3	250.8	259.6	273.2	250.8	162.8	166.6	133.8	146.8	159.1	99.8	133.8	148.4
17	164.7	156.4	163.4	123.2	167.5	196.4	211.8	220.2	223.2	170.5	125.2	116.7	138.2	141.1	99.2	63.0	88.6
18	157.6	161.8	159.1	174	186	196	215.4	219.8	202.2	47.0	94.6	87.8	100.1	110.2	49.2	87.2	88.0
19	293.5	298.5	300.2	308.1	317	323.8	330.8	340.2	339.6	320.8	277.8	242.0	257.0	261.2	200.8	216.5	224.6
20	202.5	207.5	209	220.7	232.5	236.4	244.8	254.2	256.7	226.8	163.6	142.8	164.4	173.4	101.4	125.9	115.2
21	146.2	142.6	137.8	152.8	165.5	174	185.2	194.8	201.8	163.8	81.4	72.2	101.8	115.6	99.2	62.0	17.4
22	191.1	185.9	185.6	171.3	190.4	223.2	234.6	243.8	252.0	215.4	122.2	117.1	145.8	167.2	99.2	96.8	86.0

No. P	21-oct-19	28-oct-19	04-nov-19	11-nov-19	18-nov-19	25-nov-19	02-dic-19	09-dic-19	16-dic-19	23-dic-19	30-dic-19	13-ene-20	20-ene-20	27-ene-20	03-feb-20	10-feb-20	18-feb-20	24-feb-20	02-mar-20
1	297.8	-	-	-	-	-	-	-	-	296.2	302.0	-	302.2	302.4	254.2	288.3	302.0	301.8	300
2	261.8	265.0	282.0	282.6	283.8	283.0	270.5	277.4	237.1	251.2	248.3	283.0	273.7	245.8	211.2	244.4	265.3	252.4	259.9
3	235.5	237.8	257.1	272.2	269.8	273.0	242.0	247.6	218.9	222.0	218.5	254.1	244.9	223.0	185.6	215.7	236.1	218.2	231.0
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	280.0	-	-	-	-	-	-	-	-
5	295.5	305.0	322.3	336.3	338.8	330.4	300.4	312.5	294.6	287.8	291.2	322.4	305.7	288.4	247.3	274.2	304.2	313.2	289.5
6	254.8	261.7	279.0	300	288.1	285.8	245.5	261.6	238.1	226.2	222.8	272.2	258.4	249.8	220.6	236.6	260.8	268.3	206.2
7	234.6	243.1	257.9	271.6	262.4	258.5	198.6	228.2	222.2	198.3	153.8	243.7	231.5	231.6	208.0	212.8	240.3	249.1	205.4
8	257.6	261.6	268.6	277.6	261.3	264.0	240.8	230.1	244.0	217.3	182.4	243.8	244.5	249.5	250.5	252.2	258.4	261.4	262.0
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	296.2	295.0	-	296.0	288.5	283.2	285.9	282.7	277.2	268.8
10	254.3	266.8	273.6	279.2	285.0	288.2	260.2	259.0	265.6	266.0	268.5	283.2	285.9	282.7	277.2	268.8	275.7	282.2	286.7
11	141.8	157.7	171.0	181.2	192.0	181.8	169.2	134.5	150.5	163.8	169.7	193.0	200.0	187.5	192.6	201.2	185.1	197.4	192.2
12	126.2	139.3	151.8	163.4	161.5	123.9	116.4	91.0	115.4	120.8	123.7	154.1	149.9	129.5	147.2	160.2	145.8	162.8	142.0
13	192.5	205.0	216.8	228.2	200.1	178.4	137.4	137.1	165.6	161.7	137.5	189.7	170.1	173.2	178.4	203.0	193.0	211.6	162.5
14	230.8	239.6	248.8	257.9	231.0	224.1	171.0	175.3	204.4	199.4	171.3	112.8	201.4	209.4	220.6	231.8	224.4	237.6	228.7
15	279.6	281.9	285.0	292.0	285.8	273.5	257.3	239.2	250.9	253.0	249.3	255.8	241.0	245.2	254.2	261.4	264.3	263.3	267.5
16	161.8	176.1	188.3	200.4	171.3	151.6	98.2	98.8	138.2	142.6	118.8	174.9	147.4	138.6	157.9	183.0	158.8	182.0	46.0
17	119.9	144.0	158.0	147.6	178.5	169.5	129.0	99.0	133.5	148.4	157.5	183.0	190.0	181.4	169.8	183.1	172.7	166.2	128.5
18	102.4	121.4	137.8	150.0	151.8	118.6	101.5	37.0	95.4	109.5	113.6	149.3	143.5	130.0	130.7	150.8	116.0	140.1	138.3
19	237.8	250.2	261.5	272.5	265.0	233.8	189.2	178.2	217.0	225.5	229.6	253.8	222.8	217.3	232.6	249.0	236.3	241.9	242.2
20	144.4	163.2	178.2	191.0	192.6	141.8	133.8	100.6	136.8	145.9	153.8	186.8	171.3	150.7	157.8	178.4	156.4	159.3	167.9
21	77.4	104.8	122.9	134.0	143.3	102.5	98.0	45.0	80.2	106.7	115.3	145.7	145.2	116.7	113.1	135.3	137.5	84.8	123.1
22	132.0	165.0	182.1	178.8	202.5	182.2	157.5	107.0	138.0	172.0	182.9	209.1	214.4	185.5	181.6	203.0	208.8	183.5	166.6

Profundidades del NF (m)

No. P	24-jul-19	01-jul-19	08-jul-19	15-jul-19	22-jul-19	29-jul-19	05-ago-19	19-ago-19	26-ago-19	02-sep-19	09-sep-19	16-sep-19	23-sep-19	30-sep-19	07-oct-19	14-oct-19
1	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	2.799	2.559	2.681	2.553	2.750	2.549
2	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	2.802	2.262	2.406	2.248	2.516	2.124
3	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	2.521	1.963	2.105	1.941	2.204	1.767
4	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200
5	2.818	2.890	2.934	3.200	3.200	3.200	3.200	2.528	1.594	2.868	2.310	1.482	1.652	1.600	1.838	1.846
6	3.200	2.284	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	2.304	1.220	1.074	1.546	1.862	1.906
7	2.630	2.722	2.751	2.827	2.922	3.012	3.100	2.792	2.382	2.558	2.136	0.974	1.318	1.150	1.462	1.750
8	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	2.441	2.417	1.923	2.101	2.229
9	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200
10	1.758	1.790	1.819	1.849	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	1.168	1.068	1.102	1.110	1.277
11	1.526	1.494	1.462	1.504	1.642	1.736	1.842	1.940	1.586	1.426	1.242	0.981	0.920	0.730	0.562	0.662
12	1.667	1.669	1.637	1.710	1.810	1.895	1.977	2.107	1.267	1.047	1.105	0.579	0.655	0.431	0.619	0.835
13	2.027	2.081	2.082	2.172	2.267	2.348	2.432	2.550	2.090	1.380	1.432	0.930	1.142	0.628	0.989	1.262
14	2.132	2.196	2.230	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	2.244	1.930	1.430	1.570	1.060	1.274	1.460
15	3.021	3.018	3.038	3.071	3.116	3.162	3.210	3.294	3.304	3.308	3.238	2.922	2.822	2.626	2.380	2.372
16	1.732	1.753	1.732	1.852	1.940	2.035	2.123	2.259	2.035	1.155	1.193	0.865	1.118	0.505	0.865	1.011
17	1.056	0.973	1.043	0.641	1.084	1.373	1.527	1.611	1.641	1.114	0.661	0.576	0.820	0.401	0.039	0.295
18	1.213	1.255	1.228	1.377	1.497	1.597	1.791	1.835	1.659	0.107	0.583	0.515	0.739	0.129	0.509	0.517
19	1.797	1.847	1.864	1.943	2.032	2.100	2.170	2.264	2.258	2.070	1.640	1.282	1.474	0.870	1.027	1.108
20	1.455	1.505	1.520	1.637	1.755	1.794	1.878	1.972	1.997	1.698	1.066	0.858	1.164	0.444	0.689	0.582
21	1.238	1.202	1.154	1.304	1.431	1.516	1.628	1.724	1.794	1.414	0.590	0.498	0.932	0.166	0.396	-0.050
22	1.296	1.244	1.241	1.098	1.289	1.617	1.731	1.823	1.							

Coordenadas del levantamiento topográfico

Punto	X	Y	Z	Observación
1	1000	1000	100	
6	1004.731	1004.762	99.8977	
7	1144.509	978.8687	100.0992	
8	1144.514	978.8639	100.0999	TN
9	1116.088	962.1668	100.0292	P3
10	1159.429	995.4353	100.0677	TN
11	1174.342	1010.115	100.2451	TN
12	1136.682	952.7481	101.6469	CM
13	1133.271	953.9026	101.6108	CM
14	1131.557	954.2537	101.488	CM
15	1177.452	1017.273	100.2902	CM
16	1177.433	1017.272	100.2895	P1
17	1177.987	1016.748	100.2684	POSTE
18	1181.236	1020.412	100.7791	BD
19	1144.484	959.0443	101.6484	MA
20	1143.164	960.1525	101.6206	CM
21	1141.002	961.7359	101.6579	CM
22	1139.87	962.6073	101.5624	TN
23	1138.01	959.9491	101.496	CM
24	1133.621	955.5512	101.3746	CM
25	1133.608	955.5168	101.3744	CM
26	1131.227	959.2298	100.8264	CM
27	1132.396	962.0211	100.8111	CM
28	1153.243	1036.179	100.1144	POS
29	1153.27	1007.903	99.898	TN
30	1133.26	995.8195	99.8937	TN
31	1111.537	972.5582	99.9765	TN
32	1184.793	1006.802	101.7319	MLL
33	1183.927	1007.626	101.7614	CM
34	1181.19	1009.453	101.781	CM
35	1181.191	1009.453	101.7807	CM
36	1181.987	1014.069	101.8273	BN1
37	1183.057	1015.419	101.839	ENT
38	1188.373	1011.436	101.8325	ENT
39	1118.051	968.7992	100.2849	P2
40	1089.06	980.1069	99.9454	TN
41	1103.424	1003.344	99.7523	TN
42	1114.075	1022.911	99.737	TN
43	1127.072	1046.166	99.6599	TN

Punto	X	Y	Z	Observación
44	1106.359	1057.075	99.8517	P5
45	1108.463	1061.568	100.1681	BD
46	1086.048	1037.789	99.709	TN
47	1072.69	1015.749	99.7114	TN
48	1053.675	991.6315	99.8154	TN
49	786.0816	1076.926	99.0234	TN
50	773.6383	1097.435	98.9561	TN
51	751.9571	1141.204	98.6914	P22
52	751.9685	1141.198	98.6916	P21
53	1060.146	987.9983	100.0471	P6
54	749.708	1149.748	98.722	TN
55	736.0211	1225.877	98.7445	TN
56	1019.309	1001.279	99.9251	P7
57	724.5188	1228.816	98.7965	P22
58	805.1134	1209.11	98.755	TN
59	799.5125	1185.009	98.8583	TN
60	800.6325	1071.829	98.9581	TN
61	837.7278	1059.642	99.2003	TN
62	849.5067	1098.14	98.9328	TN
63	866.6946	1152.979	99.0815	TN
64	877.8406	1188.567	98.9434	TN
65	959.4077	1165.191	99.2076	P11
66	1019.318	1001.267	99.9264	P7
67	943.5019	1116.731	99.3925	TN
68	1028.973	1035.965	99.5674	TN
69	930.2506	1074.539	99.2388	TN
70	1038.763	1074.472	99.6452	TN
71	924.321	1032.743	99.3755	TN
72	1036.453	1109.921	99.4898	P10
73	1038.944	1113.675	100.1124	BD
74	938.8356	1026.904	99.6355	TN
75	1011.208	1144.355	100.0621	POST
76	1006.823	1128.054	99.5746	TN
77	1004.13	1096.882	99.5503	TN
78	1000.376	1053.196	99.5263	TN
79	997.2471	1021.756	99.502	TN
80	998.5327	1009.221	99.702	TN
81	992.8199	1002.098	100.0348	RF1
82	1122.967	956.0827	99.9413	TN
83	791.0556	1063.016	99.1814	TN

Punto	X	Y	Z	Observación
84	1091.068	917.5191	100.0768	TN
85	1081.313	892.0904	101.6062	CM
86	1059.86	881.2047	100.3199	TN
87	821.3409	1007.877	99.22	P19
88	1016.079	829.4373	100.4313	TN
89	859.9889	944.5983	99.4517	TN
90	880.2464	971.9468	99.37	TN
91	1016.372	827.8705	100.5551	P4
92	877.895	1004.858	99.2845	TN
93	875.7638	990.6838	99.2805	TN
94	971.6736	827.5261	102.0717	CM
95	973.7208	835.0454	100.3432	TN
96	913.6637	979.6415	99.354	TN
97	918.7771	975.2242	99.5791	P14
98	947.1543	840.4656	100.2525	TN
99	965.8557	962.4458	99.5698	TN
100	941.9523	836.7345	102.0416	RF2
101	1011.126	946.9176	99.7053	TN
102	918.3293	844.158	100.3971	TN
103	1066.182	930.0436	99.8886	TN
104	890.314	889.6144	100.0141	P15
105	1094.794	921.2513	100.1125	TN
106	926.5161	838.9033	100.4074	P9
107	926.6113	838.8458	100.4075	P9
108	1049.984	870.2884	100.3751	TN
109	868.8642	928.2009	99.6762	TN
110	1015.861	890.8135	100.137	TN
111	990.0442	908.913	99.9871	TN
112	830.3269	994.7436	99.118	TN
113	974.8716	919.9947	100.1952	P8
114	938.7568	933.9198	99.7235	TN
115	795.1756	1057.624	98.9841	TN
116	769.1018	1094.241	98.8932	TN
117	771.6463	1094.362	98.8239	TN
118	782.8335	1068.427	99.0419	CM
119	789.2265	1068.693	99.0414	CM
120	1071.366	985.8608	99.9746	TN
121	1069.665	981.9932	100.1085	C
122	1068.686	979.0424	100.1059	C
123	1067.341	974.4524	99.7019	T

Punto	X	Y	Z	Observación
124	798.6383	1059.487	98.9663	T
125	800.0026	1061.814	99.0699	C
126	801.4712	1065.907	99.1668	C
127	802.0587	1068.732	99.048	T
128	1019.61	989.406	99.598	T
129	1021.371	993.5058	100.1014	C
130	1022.419	996.6137	100.0852	C
131	1024.156	1001.053	99.7216	T
132	883.6946	1044.406	99.2939	T
133	883.6888	1044.406	99.2938	P16
134	883.597	1043.589	99.3373	TN
135	882.6903	1039.343	99.3374	C
136	881.8579	1037.112	99.3	C
137	881.2216	1033.896	99.2601	C
138	952.9271	1088.108	99.3014	P12
139	956.9639	1009.67	99.5439	T
140	958.2889	1013.077	99.8502	C
141	959.5295	1015.472	99.8028	C
142	961.1211	1020.743	99.6855	C
143	861.3059	1109.776	98.9857	P18
144	999.017	996.8034	99.5449	T
145	938.9212	1027.072	99.6181	P13
146	814.4183	1211.424	99.2984	RF5
147	818.6271	1209.639	99.4647	RF6
148	862.4545	1194.052	99.1236	P17
149	862.3748	1194.158	99.1238	P17
S2A	814.418	1211.414	99.2827	
150	818.6011	1209.637	99.4649	
151	744.1049	1240.294	101.5867	S3
152	749.8352	1238.54	101.6249	R3
153	827.3197	1217.058	101.01	R3
154	827.3171	1217.056	101.0096	S4
155	833.8176	1214.759	101.0872	R4
156	877.4874	1203.165	101.2056	R4
157	877.4933	1203.164	101.2058	S5
158	884.9476	1201.222	101.3777	R5
159	949.0893	1173.186	99.775	S7
160	943.6068	1180.739	99.9751	R7
S7	949.089	1173.183	99.7586	
161	943.617	1180.724	99.9748	

Punto	X	Y	Z	Observación
162	943.6163	1180.732	99.975	
163	926.3087	1190.202	101.6235	S8
164	930.7167	1188.038	101.6727	R8
165	973.1681	1175.78	101.7736	S9
166	1005.892	1165.362	102.4313	S10
S10	1005.892	1165.362	102.4605	
167	949.0822	1173.187	99.7752	
168	949.0763	1173.187	99.7748	
169	1044.098	1108.568	100.1124	S11
S11	1044.098	1108.568	100.0745	
170	1005.893	1165.361	102.4181	
171	1005.893	1165.361	102.428	
172	1047.858	1117.972	101.6344	S12
173	1088.198	1089.305	102.3493	S13
174	1163.237	1030.49	100.405	S13
175	1163.237	1030.49	100.4052	S14
176	1182.996	1018.593	101.7285	R14
S12	1182.996	1018.593	101.7465	
177	1163.244	1030.486	100.4048	
178	1169.97	1041.745	102.4081	S15
179	1200.668	1031.799	102.6634	S16