

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Instituto de Ingeniería y Tecnología

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental



**DISEÑO DE UNA APLICACIÓN WEB DE
CALENDARIOS DE RIEGO EN TIEMPO REAL PARA
INCREMENTAR LA EFICIENCIA EN EL USO DEL
AGUA EN LA AGRICULTURA.**

Tesis presentada como requerimiento para optar por el título de Maestro en
Estudios y Gestión Ambiental

Autor: **Carol Lilliam Muñoz Ávila**

Director: **Dr. Alfredo Granados Olivas**

Ciudad Juárez, Chih., a de Abril de 2024

Revisión del Documento de Proyecto de Titulación por Director del Proyecto

(Requisito para enviarlo al Comité de Evaluación)

Después de haber revisado los aspectos técnicos, la estructura y formato del documento en general con título “Diseño de una aplicación web de calendarios de riego en tiempo real para incrementar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura”. que presenta la C. Carol Lilliam Muñoz Ávila, considero que se cumplen los requerimientos necesarios para que se proceda a su evaluación final ante el comité evaluador que designe la Academia del Programa de Maestría en Estudios y Gestión Ambiental.

ATENTAMENTE

Dr. Alfredo Granados Olivas

Ciudad Juárez, Chih., Marzo 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

INSTITUTO DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Programa de Maestría en Estudios y Gestión Ambiental

Los miembros del sínodo, nombrado por la Academia del Programa de Maestría en Estudios y Gestión Ambiental, habiendo realizado la evaluación del proyecto de titulación “Diseño de una aplicación web de calendarios de riego en tiempo real para incrementar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura”. que presenta la C. Carol Lilliam Muñoz Ávila, con matrícula 216926, como requisito parcial para acreditar la materia de Proyecto de titulación, manifiestan que ha obtenido una calificación de: / 6 puntos posibles (/ 3 documento escrito; / 3 presentación).

Director

Dr. Alfredo Granados Olivas

Evaluador

Dr. Víctor Esquivel Ceballos

Evaluador

Dr. Juan Pedro Flores Margez

Ciudad Juárez, Chih., a Abril de 2024

Dedicatoria

A mi familia,

Quienes han sido mi fortaleza y mi refugio incondicional en cada paso de este viaje. Gracias por impulsarme siempre a seguir mis sueños y alentarme en la distancia para afrontar retos en los momentos más desafiantes, por su amor incommensurable y su apoyo incansable.

A mi amado hijo Gabriel José,

Tu sonrisa ha sido mi mayor motivación y la luz que ha iluminado cada paso durante este proceso. Tu presencia ha sido un recordatorio constante de por qué vale la pena perseguir los sueños, proponerse siempre nuevas metas y seguir creciendo, soltando para aprender.

Este logro es nuestro, lo celebro y agradezco a Dios tenerlos en mi vida.

Con todo mi amor,

Carol L Muñoz Ávila

Agradecimientos

Antes de concluir este importante capítulo de mi vida académica, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que han sido esenciales en la realización de esta tesis. A mi tutor, Dr. Alfredo Granado Olivas, cuya dirección y apoyo han sido fundamentales en este proceso de investigación. Su constante estímulo y asesoramiento experto han sido cruciales para alcanzar este logro.

Al Centro de Transferencia de Tecnología e Inteligencia Artificial CeTraTecIA, por brindarme un espacio en sus instalaciones y poner a disposición sus recursos técnicos, tecnológicos y humanos para llevar a cabo este proyecto,

Al I.A Center de Ciudad Juárez por sus espacios continuos de formación y capacitación en desarrollo en tecnologías de la industria 4.0 y análisis de Datos, convirtiéndose en parte fundamental de este proceso.

A Ciudad Juárez, mi hogar durante este proceso, que con su dinamismo y particular historia ha sido una fuente inagotable de inspiración y un constante recordatorio de la resiliencia y la fortaleza que todo proceso de crecimiento requiere.

A mis compañeros de proceso, gracias por caminar a mi lado, por compartir las cargas y celebrar los logros juntos. Cada momento compartido ha añadido un valor incalculable a mi experiencia.

Finalmente, quiero agradecer a todos los que de alguna manera han contribuido a mi formación y han apoyado mi trayectoria hasta este punto. Cada palabra de aliento y cada gesto de apoyo han marcado la diferencia en este viaje.

.

Resumen

La agroclimatología permite establecer una relación entre el clima y la agricultura, prediciendo el comportamiento de variables climatológicas y sus efectos en la producción agrícola, así como facilitando el proceso de toma de decisiones en el sector y la resolución de problemas como el desarrollo y crecimiento de los cultivos, el manejo de los planes y calendarios de riego, y las condiciones de estrés hídrico en los cultivos. Este proyecto hace uso de la Inteligencia Artificial (IA) para mejorar las prácticas sobre la optimización del agua en la agricultura.

Para este fin se evaluaron datos agroclimáticos de la estación Rancho Reforma # 1 ubicada en el Centro de Transferencia de Tecnología (CeTraTec) en Ascensión, Chih., para calcular la evapotranspiración del cultivo y desarrollar calendarios de riego en tiempo real, empleando la ecuación de Hargreaves y Samani (1983?). Estos datos se transformaron en algoritmos para producir visualizaciones en PowerBi, permitiendo monitorear el comportamiento del agua en el cultivo y de esta manera producir calendarios de riego. Como resultados sobresalientes se encontró que con estos datos precisos mediados por tecnología de transferencia de datos digitales a través de un sistema LoRaWan se ha determinado una optimización en el agua de consumo para el cultivo de Nogal hasta en un 36%.

Finalmente se diseñó la interfaz de usuario para uso agrícola empleando el programa FIGMA para el diseño de prototipos computacionales. Este proyecto se desarrolló como una propuesta innovadora que apunta hacia la industria 4.0 y que permitirá a los agricultores de la región cargar y recibir información en tiempo real sobre las necesidades hídricas de sus cultivos, mejorando el proceso de toma de decisiones, además se han promovido con este proyecto las prácticas de agricultura regenerativa y de cuidado del agua como principal recurso para la sostenibilidad hídrica en la cuenca de estudio.

Contenido

Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	3
1.2. Planteamiento del problema	6
1.2.1. Área de estudio	7
1.2.2. Alcance	8
1.3. Objetivos	9
1.3.1. Objetivo general	9
1.3.2. Objetivos específicos	9
1.4. Justificación	10
1.5. Hipótesis.....	12
Capítulo 2. Marco teórico	13
2.1. Agricultura de Precisión (AP).....	13
2.2. Farmbeats	15
2.3. Evapotranspiración	18
2.3.1. Factores que afectan la evapotranspiración	20
Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET _o)	22
Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET _c)	22
Coeficiente único del cultivo (K _c):.....	22
Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET _{c aj}).....	22
2.3.2. Ecuación de Penman – Monteith para calcular la evapotranspiración	23
2.3.3. Ecuación de Hargreaves y Samani para calcular la evapotranspiración	24
2.4. Ciencia de Datos.....	25
2.4.1. Bases de datos SQL y NoSQL.....	27
2.4.2. Machine Learning	27
2.4.3. PowerBi de Microsoft	28
2.4.4. Sensores de Humedad.....	28
Capítulo 3. Metodología	30
3.1.1. Construcción de bases de datos digitales para el cálculo de la ET con la ecuación de Hargreaves y Samani. 31	
3.1.2. Extracción de Datos.....	32
3.1.3. Determinación de ET _o	34
3.1.4. Extracción datos humedad del suelo.....	35
3.2. Programación de algoritmos para producir calendarios de riego en tiempo real, a partir de la evapotranspiración y el balance hídrico del cultivo por medio de la IA en la agricultura	38
3.2.1. Determinación del Balance Hídrico y el requerimiento de riego para los cultivos de Nopal.....	39
3.2.2. Determinación de ET _c	40
3.3. Construcción de la interfaz de usuario para la plataforma de Riego en tiempo real para cultivos de Nopal en el programa FIGMA.....	42

3.3.1. Interfaz IrrigationData App.....	43
3.4. Análisis estadístico	47
Capítulo 4. Resultados y Discusión	48
4.1. Extracción y transformación de Datos	48
4.2. Determinación de ET_0	49
4.3. Humedad y Temperatura del Suelo	53
4.3.1. Determinación de ET_c	56
4.3.2. Balance Hídrico y calendarios de Eficiencia de Riego	58
4.4. Estandarización de datos y análisis estadístico	63
4.5. Construcción de la interfaz de usuario para la plataforma de Riego en tiempo real para cultivos de Nogal en el programa FIGMA.....	66
4.5.1. Paleta de Color, Logotipo e iconos	67
Capítulo 5. Conclusiones.....	75
Anexo A. Tabla de Radiación solar extraterrestre en mm/día (Allen et al., 1998) (Original en $MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$; $1 \text{ mm}/\text{dia} = 2,45 \text{ MJ} \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$	77
Anexo B. Anexo B. Tabla de Riegos programados marzo – octubre 2023	78
Referencias bibliográficas	81

Índice de figuras

Figura 1. Estados con mayor producción de nuez en México 2017 - 2021 (SIAP 2020)	2
Figura 2. Mapa de ubicación del Rancho El Regalo en donde se localiza el CeTraTeclA, Tomado Google Maps (ArcGIS 2022).....	7
Figura 3. Monitoreo de la temperatura años 2019 – 2023, ER1 (CECATEV, 2023).....	8
Figura 4. Precipitación anual promedio ER 2019 – 2023 ER1 (CECATEV-UACJ, 2023).....	8
Figura 5. Estados con mayor volumen de producción de Nuez 2017 - 2021 (SIAP 2021)	10
Figura 6. Hectáreas de huertas nogaleras plantadas vs. cosechada 2015 – 2021 (SIAP, 2021).....	11
Figura 7. Esquema de funcionamiento de FarmBeats. Adaptada fuente. (Microsoft ®. 2021).....	17
Figura 8. Diagrama transpiración de la planta, (Adaptado de Shutterstock, 2022).....	19
Figura 9. Esquema Evapotranspiración, adaptado Guía FAO 56 (FAO - UN, 2006).	20
Figura 10. Mapa de procesamiento y arquitectura de datos en la construcción de Apps (Adaptado Rastogi, 2019)	27
Figura 11. 1zq. Equipo de enlace a la antena Gateway - Der. Centro de cómputo para transferencia de datos CeTraTeclA (Archivo: Granados Olivas, 2023)	29
Figura 12. Diagrama General Metodología de trabajo. Fuente: CeTraTeclA, 2021	31
Figura 13. Estación climatológica Modelo Davis Vantage Vue 6250 (CeTraTeclA).....	33
Figura 14. Datos meteorológicos Estación Rancho Reforma Fuente (CECATEV UACJ, 2022)	34
Figura 15. Mapa muestreo para análisis de textura de suelos	36
Figura 16. Calendario de riego Rancho Reforma 2023	40
Figura 17. Kc Coeficiente de cultivo para nogal.....	42
Figura 18. Mapa de requerimientos interfaz IrrigationData App	43
Figura 19. Base de datos ER 2021 -2022 en PowerBi	48
Figura 20. Monitoreo de las variaciones en la temperatura para la ER por mes, desde 2021-2023	50
Figura 21. Registros temperatura mínima, media y máxima CECATEV 2021 – 2022.....	51
Figura 22. Evapotranspiración de referencia ET ₀ , estimación diaria RR años 2021-junio 2023.....	52
Figura 23. Variación de la humedad y la temperatura en el suelo, Sensor Noreste – franco Arenoso	54
Figura 24. Variación de la humedad y la temperatura en el suelo, Sensor Sureste – franco Arenoso	55
Figura 25. Variación de la humedad y la temperatura en el suelo, Sensor Sureste – franco Arcillo-arenoso	56
Figura 26. Evapotranspiración de referencia ET ₀ , estimación diaria año 2022.....	57
Figura 27. Comparación entre evapotranspiración de referencia ET ₀ y Evapotranspiración de cultivo ET _c estimación diaria año 2021	57
Figura 28. Comparación entre evapotranspiración de referencia ET ₀ y Evapotranspiración de cultivo ET _c estimación diaria año 2022	58
Figura 29. Precipitación registrada entre enero 2021 y junio 2023 en la estación climatológica RR	59
Figura 30. Esquema de entradas y salidas en el modelo de balance hídrico.	59
Figura 31. Diagrama de flujo determinación de los parámetros de cálculo de la lámina de riego para cultivos de Nogal. (adaptado de la guía de riego y drenaje FAO 56)	60
Figura 32. Variación de la ET ₀ , ET _c y humedad relativa en la estación RR 2021- junio 2023	66
Figura 33. Paleta de color Interfaces IrrigationData App.....	67
Figura 34. Logo CeTraTeclA	68
Figura 35. Pantalla de carga de la App.....	68
Figura 36. Interfaz Menú (Fuente: FIGMA).....	69
Figura 37. Interfaz Ubicación (Fuente: FIGMA)	70
Figura 38. Interfaz Clima (Fuente: FIGMA)	71
Figura 39. Interfaz Visualizaciones (Fuente: FIGMA)	72
Figura 40. Interfaz Sensores de Humedad (fuente: FIGMA)	73
Figura 41. Interfaz de riego (Fuente: FIGMA)	74

Índice de tablas

Tabla 1. Ejemplo Tecnologías empleadas en la AP. (Adaptado de Bongiovanni et al., 2006)	14
Tabla 2. Conceptos relacionados con la ETP, adaptado de método FAO-56 (R. Allen et al., 2006)	22
Tabla 3. Características del cultivo de Nogal Pecanero, Rancho el Regalo.....	32
Tabla 4. Resolución, Rango y precisión Sensor de Temperatura Estación Modelo Davis Vantage VUE 6250	34
Tabla 5. a. Características de las texturas de suelo adaptado CeTraTeclA (Galaviz Aragonés, 2022).....	36
Tabla 6. Fenología del Nogal pecanero adaptado Sifuentes (Sifuentes Ibarra et al., 2015)	39
Tabla 7. Valor promedio de Kc ini según el valor de ETo y el intervalo de tiempo entre riegos o lluvias en el tiempo de crecimiento inicial, para cualquier tipo de suelo. (Tomado FAO 56).....	40
Tabla 8. Coeficientes de cultivo de Nogal Kc. Adaptado Goldhamer, 2002.....	41
Tabla 9. Adaptado de FAO 56. Promedio de ETO mm/día por zona agroclimática árida - semiárida	52
Tabla 10. Configuración de sensores Sensoterra para calibración en Rancho Reforma.....	53
Tabla 11. Lámina máxima de retención textura del suelo Arcilloso	61
Tabla 12. Balance hídrico para el cultivo de Nogal, Rancho el Regalo.....	62
Tabla 13. Requerimiento de riego para el cultivo de Nogal, Rancho el Regalo, Asc. Chi.....	62
Tabla 14. Valores de humedad, ETc, ETO, lluvia y vientos, ERR 2021 - 2023	64
Tabla 15. Prueba de correlación r para ETO , ETc, Humedad, viento, lluvia promedio mensual 2021 – 2023.....	64
Tabla 16. Categorías y Subcategorías (<i>adaptado Gutiérrez et al, 2019</i>).....	66

Capítulo 1. Introducción

La agroclimatología se emplea como herramienta para determinar y analizar la relación que existe entre la variación climática y la producción agrícola. Esto permite establecer las interacciones entre el suelo, la planta y la atmósfera, siendo útil además para predecir el comportamiento de las variables y sus efectos en la producción. El manejo de esta información facilita el proceso de toma de decisiones en el sector y la resolución de problemas como el desarrollo y crecimiento de los cultivos, la respuesta de los cultivos al uso de fertilizantes, los planes y calendarios de riego, las condiciones de estrés hídrico en los cultivos, los efectos de la contaminación del ambiente, y el incremento en temperatura de la atmósfera, entre otros ((FONADE et al., 2013)

Para el año 2050 se pronostica que la población mundial incremente en aproximadamente 2200 millones sumando un estimado total de 9700 millones de personas y se necesitará incrementar la producción de alimentos en aproximadamente un 70% (UNESCO, 2016). El aumento en la población, la creciente urbanización, el desarrollo de la industria y el cambio climático, generarán una marcada competencia por los recursos hídricos, lo que obligará a establecer sistemas y políticas de gestión de los recursos hídricos más eficientes que garanticen la sostenibilidad de los procesos, bajo la premisa de producir más con menos recursos. Estimaciones del Banco Mundial precisan que será necesario concentrar esfuerzos a nivel global y regional, sobre todo en las regiones cuyo estrés hídrico sobrepase el 25% (Banco Mundial, 2021)

En su informe del 2020 el servicio de información agropecuaria y pesquera (SIAP) de México, consolida al estado de Chihuahua como el estado de mayor producción de Nuez del país, con un volumen aproximado de 102 mil toneladas producidas con un rendimiento de 1.49 toneladas por hectárea, seguido por los estados de Sonora y Coahuila. Solo este cultivo representa un consumo de alrededor del 40% del total de agua disponible para riego en estos estados. Teniendo en cuenta el estrés hídrico de la región, es necesario entonces, para los agricultores emplear prácticas de cultivo que permitan optimizar los recursos y hacer un uso más eficiente del agua de riego, pero sin dejar de favorecer la producción (SIAP, 2021) ver Figura 1.

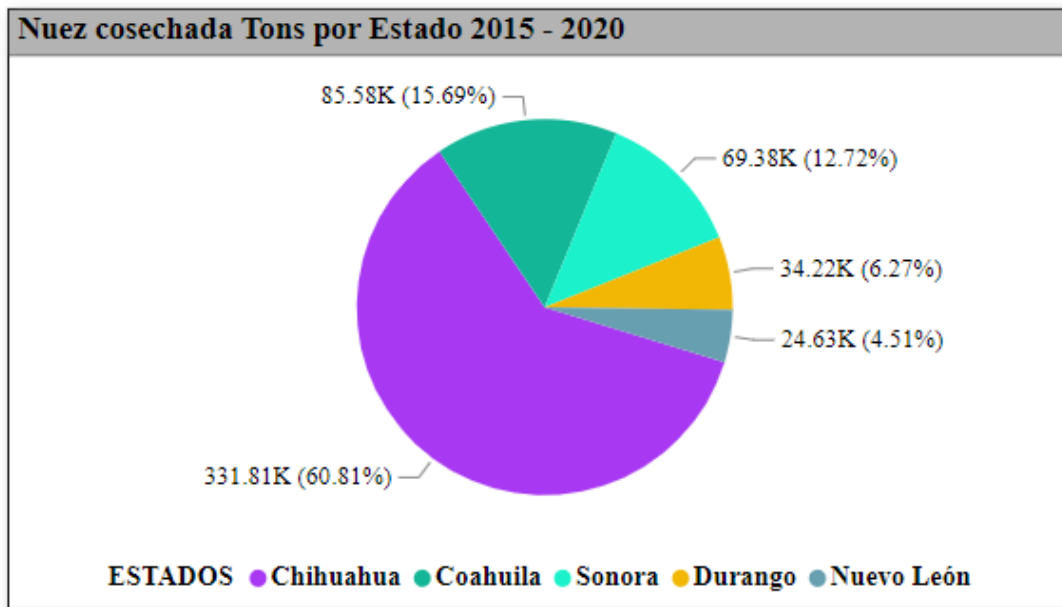


Figura 1. Estados con mayor producción de nuez en México 2017 - 2021 (SIAP 2020)

Por otro lado, estimar la evapotranspiración (ET) en tiempo real se plantea como un reto en la optimización del recurso hídrico en la región, siendo necesario recurrir al uso de equipos de medición de mayor sofisticación que tengan acceso a datos meteorológicos y que permitan el mapeo aéreo de los cultivos con ayuda de drones dotados con cámaras de alta sensibilidad, además del monitoreo de parámetros físico-químicos del suelo y el uso de sensores que permitan además la detección de la humedad de suelo. En los cultivos las características del suelo pueden cambiar en cuanto a espacio, profundidad y tiempo. La agricultura de precisión permite emplear técnicas instrumentales, telemétricas y piezométricas que, aplicadas a la agricultura regenerativa, pueden usarse para recolectar datos climatológicos y cuantificar el estrés hídrico del cultivo generando información suficiente para estimar la evapotranspiración para así favorecer la productividad, respondiendo a las necesidades particulares de cada segmento de suelo y optimizar el uso de los insumos fertilizantes y agua de riego (Bongiovanni et al., 2006).

Durante los últimos años el proyecto FarmBeats de Microsoft ha abierto la puerta a técnicas basadas en el internet de las cosas (IoT), para mejorar la recolección de datos en el campo en donde en muchas ocasiones la conectividad y el uso de tecnología se ve limitado. Estos datos pueden ser procesados por medio de lenguajes de programación que permiten generar acciones, códigos y

algoritmos para la creación de aplicaciones informáticas y programas de computador que permitan controlar el comportamiento del movimiento del agua en el suelo. Este estudio se encuentra vinculado al proyecto FarmBeats de Microsoft® y se desarrolló en vinculación con el Centro de Inteligencia Artificial del estado de Chihuahua en donde se emplearon técnicas combinadas de agricultura de precisión y ciencia de datos que han sido aplicadas por otros investigadores para obtener avances en el campo de producción agrícola y la preservación de recursos naturales (Ranveer et al., 2017)

1.1. Antecedentes

Según el informe del 2019 emitido por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) del gobierno de México, el volumen de agua renovable per cápita a nivel nacional es de 3656 m³/hab./año. Sin embargo, este valor no permite visualizar la panorámica de las regiones con mayor estrés hídrico en el territorio. Para el estado de Chihuahua su volumen per cápita apenas alcanza 1019 m³/hab./año y se estima que el volumen alcanzará los 894 m³/hab./año en el año 2030. En cuanto al agua renovable al 2018 el volumen por hectárea cúbica era de 12844 por año representando un 76.1% en la presión hídrica, considerándose como una condición de escasez según el índice Falkenmark contemplando además el riesgo por sobre explotación de las aguas subterráneas y las consecuencias que el abatimiento del nivel freático de los acuíferos puede traer para los ecosistemas y la comunidad (CONAGUA, 2019). El uso del agua en los cultivos de nogal depende de factores tales como la edad del árbol, la disponibilidad de la humedad, la densidad foliar de la planta entre otros, haciendo del suministro de agua un asunto de interés en los productores de la región. Sin embargo, la cantidad de información sobre las variables espacio-temporales del uso del agua en cultivos de nogal es limitada requiriendo de una mayor exploración en el campo (López et al., 2021)

Por otro lado, Samani y colaboradores (2009) llevaron a cabo un estudio que buscaba estimar la radiación solar y referenciar la evapotranspiración del cultivo utilizando datos climatológicos mínimos, modificando la ecuación original de Hargreaves - Samani que empleaba la temperatura máxima y mínima para estimar la radiación solar y la evapotranspiración del cultivo de referencia. Esta modificación propuesta permite la corrección de errores relacionados con parámetros climatológicos indirectos que puedan alterar el rango de temperatura referenciado, aumentando la

precisión de las estimaciones de radiación solar a partir de la temperatura. Además, este estudio encuentra que la relación muestra que el coeficiente empírico (KT), en sí mismo es una función de la diferencia de temperatura, por lo que a medida que disminuye la diferencia de temperatura, el KT cambia de un valor bajo de 0,13 a un valor alto de 0,24 con una variación de hasta un 85 % (Samani et al., 2009)

En el 2017 se presentó en redes el proyecto FarmBeats, un programa incentivado por Microsoft® que busca llevar conectividad al campo empleando vehículos aéreos no tripulados (VANT) y sensores de bajo costo conectados a una puerta de enlace inteligente que direcciona los datos hacia la nube, generando bancos de información en tiempo real que permiten tener datos precisos sobre las características topográficas, hidrológicas y climatológicas de una región que son usados para la programación de algoritmos de aprendizaje automático (machine learning) en campos como la agricultura de precisión, la industria, la acuicultura y otros campos de interés económico y científico. Este estudio demuestra que su implementación favorece el rendimiento de la producción, la reducción de costos y la garantía de la sostenibilidad (Ranveer et al., 2017)

También en 2015 en Sinaloa (México) se realizó un estudio en el que se estimó la evapotranspiración y el coeficiente de cultivo de chile bell en el valle de Culiacán, empleando el método de covarianza de torbellinos, con el fin de mejorar la precisión obtenida con la ecuación de Penman – Monteith para la determinación de la evapotranspiración de los cultivos. Este estudio encontró que haciendo uso del método FAO-56 para la estimación de la evapotranspiración de los cultivos, se sobreestimó en un 36% la evapotranspiración acumulada, con respecto a los resultados obtenidos por el método de Covarianza de Torbellinos (CE). También se concluye que los coeficientes de cultivo (Kc) se encuentran determinados además por condiciones como el manejo del cultivo y son fuertemente influenciados por las condiciones de medición, para este caso el valor de Kc puede explicarse por la cobertura de terreno en comparación con otros estudios (López Avendaño et al., 2015)

Posteriormente durante el 2020 fueron llevados a cabo diferentes estudios que apuntan al uso de la telemetría con el fin de incrementar la precisión en la toma de datos. Brenes y colaboradores de la Universidad de Costa Rica (2019), realizaron un estudio centrado en la caracterización de sistemas que emplean la Inteligencia Artificial (IA) demostrando la forma cómo estos apoyan la

toma de decisiones en campos como la agricultura de precisión para este caso bajo invernadero. Dentro de sus hallazgos reportan que los parámetros relacionados con las variables físicas del clima están siendo empleados en una mayor medida, mientras que los que se relacionan con el suelo se emplean menos, posiblemente debido a los costos y facilidad de adquisición de los instrumentos, así como su especificidad. En cuanto a los parámetros de medición sobre las plantas el monitoreo es escaso y las soluciones reportadas tienden a la mera visualización de los datos recolectados. Finalmente, este equipo reporta dentro de los beneficios del uso de las técnicas de IA, la optimización en el rendimiento de los cultivos, así como en las dosis suministradas de nutrientes, una mejora en el manejo de plagas y enfermedades, una disminución de los recursos empleados (Brenes et al., 2019)

En otro estudio llevado a cabo durante el 2020 en la Universidad Nacional de Agronomía de Lima –Perú, se estimó la evapotranspiración en un cultivo de arroz, empleando el algoritmo METRIC e imágenes provenientes de cámaras multispectrales acopladas a un dispositivo VANT (vehículo aéreo no tripulado), encontrando que el uso de estas permitía obtener imágenes de mayor resolución y que las imágenes capturadas podían ser empleadas como insumos para estimar la evapotranspiración, mostrando resultados similares a estudios realizados en el cultivo de arroz con torres de covarianza de torbellino; con un error promedio entre el 11 y el 22 % (Quille-Mamani et al., 2021)

Estudios más recientes llevados a cabo (Zhao y Zhuym 2021) se aproximan a un nuevo enfoque para estimar la evapotranspiración freática espacio-temporal a escala regional empleando para esto mediciones del índice normalizado de vegetación (NDVI) y la profundidad del nivel freático. El estudio fue llevado a cabo en el distrito de riego de Hetao, encontrando que para este caso la evapotranspiración freática contribuye en promedio con un 24,4 % a la evapotranspiración de referencia y que este valor demuestra su papel esencial en el desarrollo de los cultivos y el entorno ecológico general en zonas áridas y áreas con poca profundidad de nivel freático. Este enfoque de estimación de la evapotranspiración freática puede ser utilizado para diseñar políticas de gestión de recursos hídricos efectivas y eficientes a escala regional (Tianxing et al., 2022)

1.2. Planteamiento del problema

Estimar la evapotranspiración (ETP) de un cultivo es un elemento determinante en la optimización del recurso hídrico en la agricultura. Este cálculo se emplea en la planeación del desarrollo urbano y agrícola, en la calendarización de los riegos y en la determinación del balance hídrico en las regiones, así como en aplicaciones relacionadas con la agroclimatología. Los métodos como el de Penman-Monteith, son altamente recomendados por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, ONUAA, (más conocida como FAO por sus siglas en inglés) para este fin, debido a su amplio estudio y el fácil ajuste a períodos de tiempo cortos. Sin embargo, el cálculo de la ETP por este método, requiere un rango de datos climatológicos muy específicos que no siempre están disponibles, especialmente en países en vías de desarrollo (Samani, 2000). Incluso en países desarrollados no se cuenta con el suficiente número de estaciones climatológicas que permitan recolectar datos necesarios para desarrollar el cálculo de la ETP. Además, los instrumentos utilizados están limitados por los errores en estabilidad al medir parámetros climatológicos como la radiación solar y la humedad. Hargreaves y Samani proponen entonces una ecuación simplificada, que ha sido empleada con éxito para calcular la ETP en lugares donde la falta de datos dificulta la aplicación de otros métodos (Samani, 2000).

Por otra parte, la implementación de técnicas que incluyen sensores de medición y otros instrumentos telemétricos, permiten la captura de grandes volúmenes de información en tiempo real, que sirve para determinar con mayor precisión el estado y necesidades inmediatas de los cultivos. Sin embargo, la interpretación de datos se convierte entonces en un reto en la era de la información; el uso de instrumentos telemétricos, sensores, drones con cámaras de alta sensibilidad, data loggers etc., es hoy una realidad en las cadenas de producción agrícola. En este sentido, la tecnología abre espacio permitiendo obtener una cantidad suficiente de datos en tiempo real, generando una oportunidad de innovar en el área al combinar prácticas de agricultura regenerativa, inteligencia artificial (IA) y ciencia de datos.

Dicho esto, se plantea en esta investigación la siguiente pregunta ¿Cómo mejorar el uso de la tecnología y la IA, para estimar la ETP en la producción de alimentos, por medio de la generación de insumos informáticos que ayuden en la optimización del uso del agua en la agricultura?

1.2.1. Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el Centro de Transferencia de Tecnología en Inteligencia Artificial (CeTraTecAI) ubicado en Ascensión, Chihuahua, México, 40 km al sur de Columbus, Nuevo México, EE. UU. Latitud 31.5°, longitud 107.71° y una elevación 1227msnm. Este centro es un espacio usado para promover el uso y transferencia de tecnología y la inteligencia artificial para la agricultura, pero centrada en el ser humano, buscando comunicar a los agricultores locales los beneficios que representa incrementar la eficiencia del riego, así como emplear prácticas de conservación del suelo (Granados-Olivos et al., 2021). ver Figura 2.

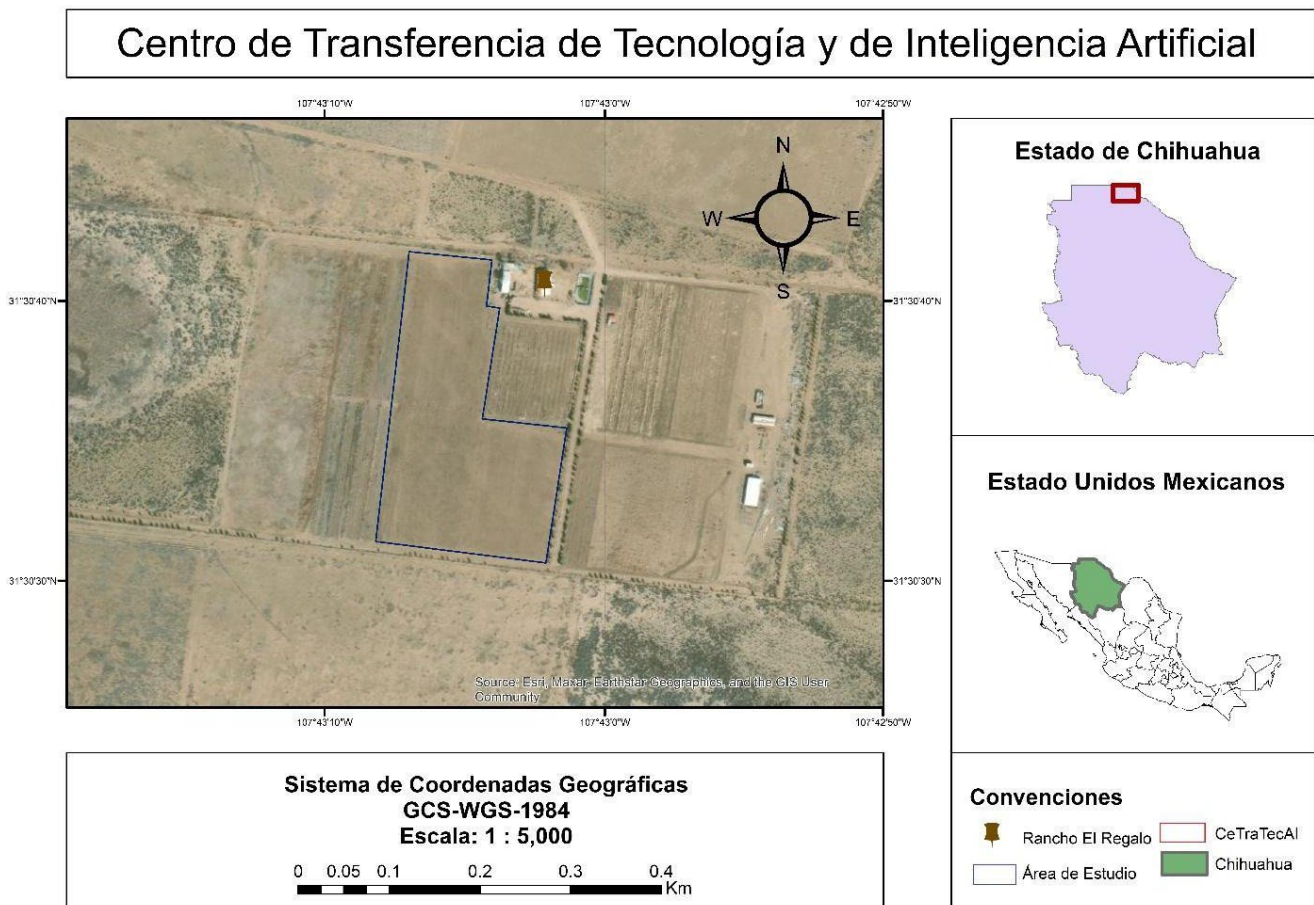


Figura 2. Mapa de ubicación del Rancho El Regalo en donde se localiza el CeTraTecIA, Tomado Google Maps (ArcGIS 2022)

El clima en esta región se considera muy seco templado, con registro de temperaturas máximas hasta de 42° C en verano y mínimas hasta de -11° C en invierno según datos medidos por la estación meteorológica Rancho Reforma # 1, (ER1) en los últimos 4 años Fig. 3. Las lluvias por

otra parte son escasas según los datos obtenidos de NOAA en donde se muestran un total de apenas 110mm anuales de precipitación Fig. 4 (CECATEV UACJ, 2022).

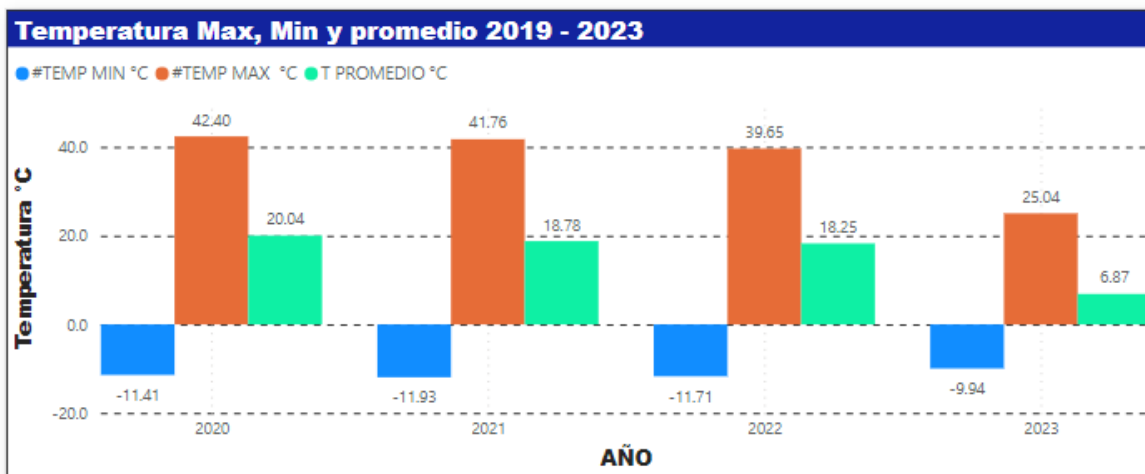


Figura 3. Monitoreo de la temperatura años 2019 – 2023, ER1 (CECATEV, 2023)

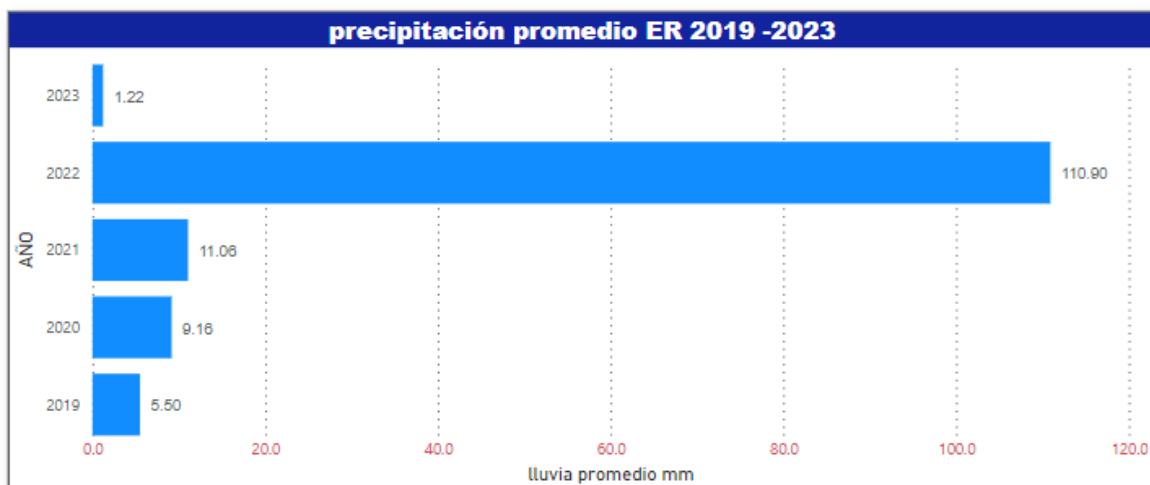


Figura 4. Precipitación anual promedio ER 2019 – 2023 ER1 (CECATEV-UACJ, 2023)

1.2.2. Alcance

Para el presente estudio se consideraron los alcances resultantes teniendo en cuenta la revisión bibliográfica realizada y las perspectivas del estudio, que se encuentran plasmadas en los objetivos del mismo; definiendo entonces lo siguiente:

- **Exploratorio:** A pesar de los grandes avances en el uso de técnicas telemétricas para calcular la ET de los cultivos, el análisis y uso de los datos en este campo presenta un desafío en la actualidad en donde la combinación de técnicas de agricultura de precisión y ciencia de datos demandan calificaciones especializadas. En esta investigación se incrementó la precisión en la toma de datos y se empleó esta información para diseñar un algoritmo en el lenguaje Python3 aplicado en el programa computacional Power BI, enfocando los resultados a la generación de aplicaciones novedosas para el área de estudio.
- **Descriptivo:** En este ámbito el estudio determinó cómo se comportó la ET en el cultivo de Nopal en la región de estudio, logrando de esta manera realizar mediciones más precisas sobre las condiciones climatológicas, meteorológicas y edafológicas del área de estudio.
- **Correlacional:** El diseño de una interfaz computacional en un lenguaje computacional amigable para el usuario a través de una interfaz, permitió establecer predicciones relacionadas con los datos colectados, así como comparaciones entre los datos y los resultados obtenidos en cuanto a la eficiencia y la ET del cultivo para la toma de decisiones en tiempo real.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Diseñar una interfaz para una aplicación web, de calendarios de riego en tiempo real, a partir de datos agroclimáticos y edafológicos, para incrementar la eficiencia en el uso del agua de riego en la agricultura.

1.3.2. Objetivos específicos

- Construir bases de datos digitales a partir de la información capturada por los sensores de humedad del CeTraTecIA y la estación meteorológica Rancho Reforma (UACJ), para calcular la evapotranspiración (ET), con la ecuación para datos climatológicos mínimos de Hargreaves – Samani y el contenido de humedad en el suelo en tiempo real.
- Programar algoritmos para producir calendarios de riego, a partir de la evapotranspiración del cultivo ETc y el balance hídrico.

- Diseñar la arquitectura de la interfaz de usuario para la aplicación web de calendarios de Riego en tiempo real, para cultivos de Nogal en el programa FIGMA

1.4. Justificación

El estado de Chihuahua ocupa el primer lugar en la producción de Nogal en el país con un volumen de producción que al 2020 supera en más del doble a los estados de Sonora y Coahuila. Durante los últimos años las áreas de cultivo de Nogal han ido en aumento de manera considerable en el país, reportando para el 2016 un incremento del 83% en su producción, esto consolidó a México como el sexto país exportador a escala mundial de nuez y el primero en la variedad de nuez Pecanera. El 95% de esta producción corresponde a los estados de Chihuahua, Sonora, Coahuila, Durango y Nuevo León. Fig.5 (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural & Gobierno | gob.mx, 2017)

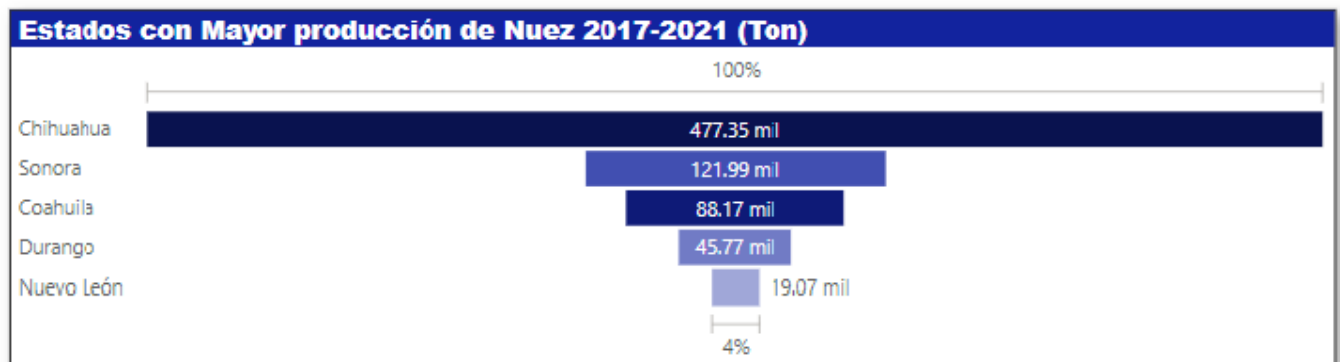


Figura 5. Estados con mayor volumen de producción de Nuez 2017 - 2021 (SIAP 2021).

En la actualidad se pueden observar diferencias considerables entre la cantidad de nogal plantado por hectáreas y la cantidad de hectáreas cosechadas (Fig. 6), la etapa productiva del nogal alcanza su madurez hasta los 10 años, por lo que las plantaciones jóvenes representan un desafío para los productores, quienes requieren inversiones tecnológicas y técnicas durante estos años para garantizar una producción de nueces con tamaño y calidad necesaria para su comercialización. Según Ojeda – Barrios en el 2005 un 80% de la producción de nogal se encuentra en manos de pequeños productores y de estos un solo 32% contaba con un buen nivel tecnológico. Sin embargo,

estas cifras de producción permiten estimar el potencial y la derrama económica que representa el cultivo de nogal a futuro para el estado de Chihuahua (Ojeda-Barrios et al., 2010).

El nogal pecanero, tiene un requerimiento hídrico alto que puede variar según las condiciones climáticas, el suelo y la etapa fenológica del cultivo, estimando para un árbol adulto con copa de 12m, un volumen de aprox. 1100L/día (Sifuentes Ibarra et al., 2015). La precisión en la determinación del riego, así como la fertilización, el control de plagas entre otros factores juegan un papel importante en la calidad, así como en la eficiencia del cultivo.

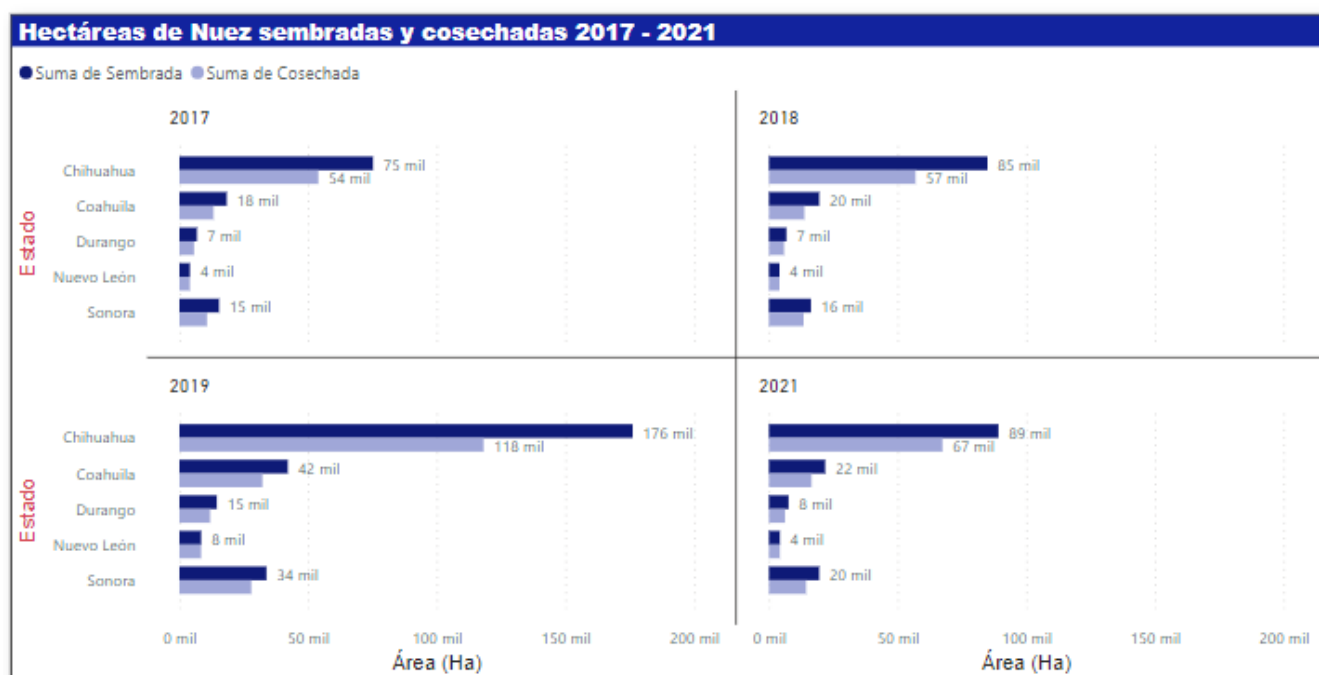


Figura 6. Hectáreas de huertas nogaleras plantadas vs. cosechada 2015 – 2021 (SIAP, 2021)

En regiones con un alto estrés hídrico como Chihuahua la optimización del agua de riego es una herramienta fundamental para que el agricultor pueda disminuir las pérdidas que existen desde el inicio del crecimiento del fruto hasta la cosecha de la nuez, incrementando la posibilidad del rendimiento de la producción. La evapotranspiración es un valor necesario para estimar el requerimiento de agua del cultivo durante cada etapa fenológica. El método recomendado por la FAO para la estimación de la evapotranspiración es el de Penman-Monteith. Sin embargo, requiere un rango de datos climatológicos muy específicos que no siempre están disponibles. Desde esta

perspectiva este proyecto uso técnicas de agricultura de precisión, agricultura regenerativa y ciencia de datos, para desarrollar una aplicación geoinformática que generó calendarios de irrigación para el cultivo de nuez Pecanera (Nogal), basado en la evapotranspiración del cultivo a partir del cálculo con ecuaciones publicadas que pudieran ser aplicables para la zona de estudio (Samani, 2000). H₀. El uso de esta aplicación digital (App) permitirá establecer con precisión los calendarios de riego agrícola, así como la cantidad necesaria de agua para el cultivo, optimizando el volumen del recurso hídrico empleado en sistemas tradicionales de riego en los cultivos de nogal de la región.

1.5. Hipótesis

H₀. El uso de esta aplicación digital (App) permitirá establecer con precisión los calendarios de riego agrícola, así como la cantidad necesaria de agua para el cultivo, optimizando el volumen del recurso hídrico empleado en sistemas tradicionales de riego en los cultivos de nogal de la región.

Capítulo 2. Marco teórico

En este capítulo se plantearán brevemente algunos aspectos que servirán como referentes en el proceso de construcción de la aplicación geoinformática, basada en el cálculo de la evapotranspiración de un cultivo de nogal a partir de datos agroclimatológicos. Dentro de estos se desarrollarán los conceptos claves incluidos dentro del proyecto como son la agricultura de precisión, el proyecto FarmBeats, el proceso de cálculo de la evapotranspiración, así como los métodos empleados para la estimación del requerimiento de riego para un cultivo de nogal.

2.1. Agricultura de Precisión (AP)

El uso de satélites, los sistemas de información geográfica (SIG) y los sensores remotos (SR) son empleados en la agricultura de precisión para incrementar el rendimiento de los cultivos y minimizar los impactos ambientales. De igual manera, se pueden emplear sensores específicos basados en el Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés), para monitorear la humedad y temperatura del suelo, el comportamiento climatológico de las regiones, las emisiones de carbono y el crecimiento de las plantas durante los ciclos de la cosecha. Por ejemplo, los sistemas posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés) favorecen la aplicación de los insumos aumentando la precisión, logrando así reducir el uso excesivo de fertilizantes y la generación de residuos contaminantes (García & Flego, 2008).

La AP no solamente consiste en la medición de parámetros y variables en el área de interés, además se deben incluir acciones en función de los datos colectados, observar y determinar los comportamientos y propiedades en los cultivos no es nuevo. El aporte de la AP se relaciona con la posibilidad de administrar la información, logrando una visión holística del conjunto de datos que permita cuantificar, mapear y de ser posible georefenciar, para aplicar insumos con mayor precisión. Este proceso se puede resumir en 3 etapas (Bongiovanni et al., 2006)


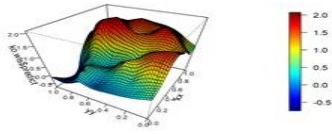
- Recolección de datos
- Procesamiento e interpretación de la información

- Aplicación de insumos

El uso de riego de precisión en los cultivos ha demostrado ampliar la productividad de los cultivos hasta un 45% y disminuir el consumo de agua en un 35%, estas en combinación con otros métodos como aplicación de nutrientes y semillas también han demostrado ser eficientes (Bongiovanni et al. 2006). Actualmente el uso de drones, con capacidad de generar imágenes aéreas han permitido a los agricultores ampliar la cantidad y disponibilidad de los datos, monitoreando cultivos de forma eficiente, en tiempo real y en algunos casos de manera remota. A continuación, en la Tabla 1 se pueden observar las principales técnicas desarrolladas por la AP que son de amplio uso en la agricultura.

Tabla 1. Ejemplo Tecnologías empleadas en la AP. (Adaptado de Bongiovanni et al., 2006)

TECNOLOGÍAS EMPLEADAS EN LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN	
<p>Sistema de Posicionamiento Global (GPS)</p> 	<p>Es un sistema de navegación por satélite, que permite al usuario conocer su posición en la tierra, en cualquier momento y bajo cualquier situación climática, esta información es almacenada por el dispositivo para después ser enviada a un ordenador se encuentra operado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América.</p>
<p>Sistemas de Información Geográfica (SIG)</p> 	<p>Esta tecnología es una importante herramienta para el manejo de información, la cual usa un modelo georreferenciado en donde los datos se asocian con información gráfica como planos o mapas a bases de datos digitales. Integrando gráficas y datos alfanuméricos que permiten abordar sistemas complejos de información.</p>
<p>Percepción Remota</p> 	<p>Estos sistemas de sensores están compuestos por una parte óptica, cuya función es captar y dirigir la energía de los objetos hacia los detectores. Los sistemas de sensores remotos pueden ser: terrestre, suborbital y orbital.</p>

<p>Tecnologías de dosis variable (sensores, controladores, etc.)</p> 	<p>La AP nos brinda la posibilidad de tomar decisiones basadas en la información recolectada, por ejemplo, en la aplicación de insumos cuando se asumen características homogéneas en los suelos, los insumos son aplicados por igual, desconociendo las necesidades de cada segmento. La AP facilita cuantificar la variabilidad del lote, generando datos para la respuesta variable a la aplicación de insumos permitiendo una aplicación más eficaz.</p>
<p>Análisis de datos georreferenciados (Geoestadística)</p> 	<p>Diversas herramientas empleadas para evaluar asociaciones espaciales y dar respuesta en forma numérica a las tendencias de comportamiento de una variable en particular, predecir su carácter productivo y establecer la calidad de un cultivo con su relación al espacio y el tiempo. Son aproximaciones de interés principal en la geoestadística.</p>

2.2. Farmbeats

Desde hace algunos años el proyecto FarmBeats de la empresa Microsoft ® ha desarrollado una plataforma basada en el internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés) que emplea sensores de gran ancho de banda para transmitir señales usando los espacios vacíos del espectro de TV. Estos espacios pueden ser empleados para enviar datos geoespaciales a la nube de información (AZURE), representado un gran avance en la transmisión de información a menor costo en las zonas más apartadas donde las conexiones a internet son pocas o inexistentes (Ranveer et al., 2017)

Esta plataforma se conecta con sensores que se encuentran distribuidos en el cultivo, para el monitoreo de propiedades como la humedad en el suelo, el pH, la temperatura entre otros datos, por medio de un ordenador local a una puerta de enlace inteligente, que direcciona los datos hacia la nube generando bancos de información en tiempo real, que permiten tener información precisa sobre las características topográficas, hidrológicas y climatológicas de una región. Estos datos pueden ser usados en campos como la agricultura de precisión, la industria, la acuicultura y entre otros de gran interés económico y científico, en tareas como el seguimiento de animales y monitoreo del almacenamiento de recursos, monitoreo de clima y la dinámica de los cultivos,

generando información analítica instantánea, para promover la toma de decisiones basada en la información.

Esta plataforma basada en IoT se emplea en la AP haciendo uso de sensores de humedad y temperatura en los suelos, cámaras espectrales, drones y sensores de vuelo, permitiendo así la recolección de datos a gran escala, garantizando su disponibilidad incluso ante situaciones como cortes de luz o de conexión a internet, causados por el mal tiempo. Permite guardar y analizar los datos necesarios para que el agricultor pueda monitorear o incluso comparar las condiciones de sus cultivos y tomar decisiones en tiempo real basadas en la información suministrada. Este sistema se ha implementado en dos granjas de EE. UU para tres aplicaciones en particular: AP, monitoreo de temperatura y humedad en el almacenamiento de alimentos y monitoreo de animales (Ranveer et al., 2017).

Como desarrollo este tipo de proyectos responde a 3 desafíos clave: primero la conectividad en la granja, aprovechando los espacios vacíos del espectro de televisión (TVWS por sus siglas en inglés) para lograr una puerta de enlace desde la conexión a internet del hogar del agricultor hasta la estación base del IoT del cultivo. Todos los sensores e instrumentos pueden conectarse a esta estación a través de una conexión inalámbrica (Wi-Fi). En segundo lugar, la conexión a internet en zonas rurales suele ser débil, lo que dificulta el envío de elementos de varios gigabytes (GB) de información a la nube. FarmBeats usa protocolos de bajo alcance y red amplia (LoRaWAN por sus siglas en inglés) en donde un computador puede servir como puerta de enlace entre los datos colectados por los sensores y la nube en la que estos serán almacenados con dos propósitos principales: realizar cálculos significativos en los datos del cultivo y consolidarlos en resúmenes para su posterior análisis e interpretación. Por otra parte, esta puerta de enlace funciona de forma independiente respondiendo a los períodos de interrupción de conexión, lo que garantiza continuidad en la disponibilidad de la información. Se incorpora además un algoritmo de planificación de rutas en la puerta de conexión a FarmBeats, aprovechando el viento para así favorecer el consumo de energía del dron al acelerar y desacelerar.

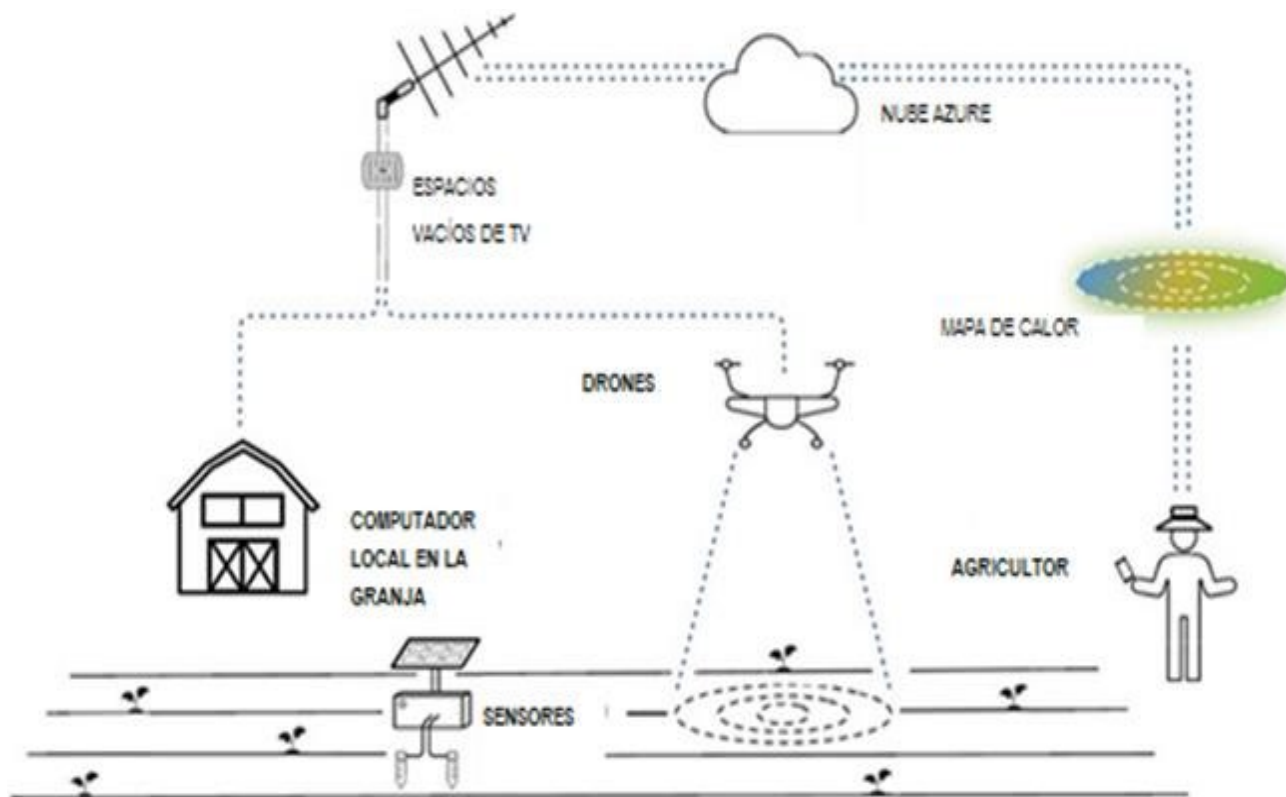


Figura 7. Esquema de funcionamiento de FarmBeats. Adaptada fuente. (Microsoft ®. 2021)

La agricultura de precisión requiere de la elaboración de mapas que contengan información sobre las características particulares de las condiciones de la granja, con datos como la temperatura, la humedad del suelo, los niveles de nutrientes del suelo, entre otros. La elaboración de estos mapas, brindan sistemas de información en un mapa digital los cuales son útiles en la toma de decisiones y el aprovechamiento de los recursos destinados al cultivo. FarmBeats permite utilizar las imágenes de los drones y combinar esta información con los datos de los sensores de tierra para generar mapas a un bajo costo (Ranveer et al., 2017).

Dentro de los aportes generados por esta plataforma podemos listar los siguientes:

- Precisión en los servicios de irrigación de los cultivos
- Precisión en la determinación del pH del suelo
- Predicciones sobre el rendimiento del cultivo
- Predicciones sobre la infestación por plagas

- Precisión en la aplicación de los fertilizantes
- Pronóstico del tiempo micro-climático basado en los sensores.

2.3. Evapotranspiración

Se entiende por evaporación al proceso mediante el cual las moléculas de agua que se encuentran en la superficie irradiada (cuerpo de agua, suelo, planta) superan la presión de vapor del agua en la atmósfera circundante y se convierten en vapor (Líquido ó Gaseoso), en un proceso conocido como vaporización, donde el vapor es removido de la superficie. Es un proceso endotérmico y absorbe energía proveniente de la radiación solar directa y en una menor proporción la temperatura del aire. En la evaporación los parámetros climatológicos como la velocidad del viento, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica, son determinantes al momento de evaluar el proceso, debido que a medida que el agua se evapora, la atmósfera circundante se va saturando, hasta que el aire adquiere la humedad suficiente para no transferirse a la atmósfera, dependiendo principalmente de la velocidad del viento para mantener el equilibrio aire seco- aire húmedo. En caso de que la superficie que evapora el agua sea del suelo, el proceso se verá además afectado por la cobertura vegetal del suelo y la cantidad de agua que se encuentre en la superficie, factores como la lluvia y el riego ayudan a mantener esta condición en el suelo (R. Allen et al., 2006).

La transpiración por su parte es el proceso empleado por las plantas para vaporizar el agua líquida contenida en sus tejidos a través de las estomas, que son estructuras especializadas para el intercambio gaseoso de dióxido de carbono y vapor de agua. Estas estructuras pueden controlar la tasa de intercambio de vapor con la atmósfera, variando la densidad de las estomas en las hojas, esto es un mayor número por unidad de área en las hojas nuevas cuando se producen estableciendo así una respuesta adaptativa a las condiciones climáticas. En los que el aumento de la radiación solar puede lograr cambios en las proteínas de membrana de los cloroplastos, desnaturalizándolas al sobrecalentarse, produciendo una apertura de los estomas para liberar el agua y de esta manera se regula la temperatura, ver figura 8. De la misma manera en condiciones de sequía, la transpiración excesiva puede provocar la sequedad haciendo que las plantas de áreas cálidas pueden beneficiarse al tener menos estomas y de esta manera conservan el agua (Nievola et al., 2017).



Figura 8. Diagrama transpiración de la planta, (Adaptado de Shutterstock, 2022)

Estos procesos dependen del gradiente de presión de vapor y de la velocidad del viento, siendo importante para su determinación además condiciones como la radiación, la temperatura y la humedad del aire. La capacidad del suelo para transportar el agua hasta las raíces, la concentración de sales y la humedad del suelo también influyen en la tasa de transpiración. Dependiendo entre otras condiciones del tipo de cultivo y las prácticas empleadas para su producción. Los procesos de evaporación y transpiración suceden en simultáneo, la evaporación de un cultivo se establece en primer lugar por la fracción de la radiación solar que alcanza al suelo. Esta fracción disminuye con el crecimiento del cultivo debido a que el dosel va sombreando el área del suelo a medida que crece ver figura 9. En los cultivos pequeños, el agua se pierde por evaporación del suelo, pero al crecer el cultivo y cubrir por completo el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal. La combinación de los dos procesos se conoce como evapotranspiración ETP, este parámetro se expresa en unidades de milímetros por unidad de tiempo en unidades de altura de agua, representando el volumen de agua liberado por la superficie de cultivo por el tiempo que se puede establecer en horas, días, meses o períodos completos de cultivo. La altura del agua hace referencia al calor latente de vaporización (λ) en función de la temperatura, por lo tanto λ ETP se puede expresar como $\text{MJ m}^{-2}\text{día}^{-1}$ (R. Allen et al., 2006).

La cantidad de radiación solar debe ser suficiente para que se lleve a cabo la transpiración; es un actor que involucra la física de la evaporación y asume que el agua requiere una cierta cantidad de energía, normalmente 2.45 kJ por milímetro.

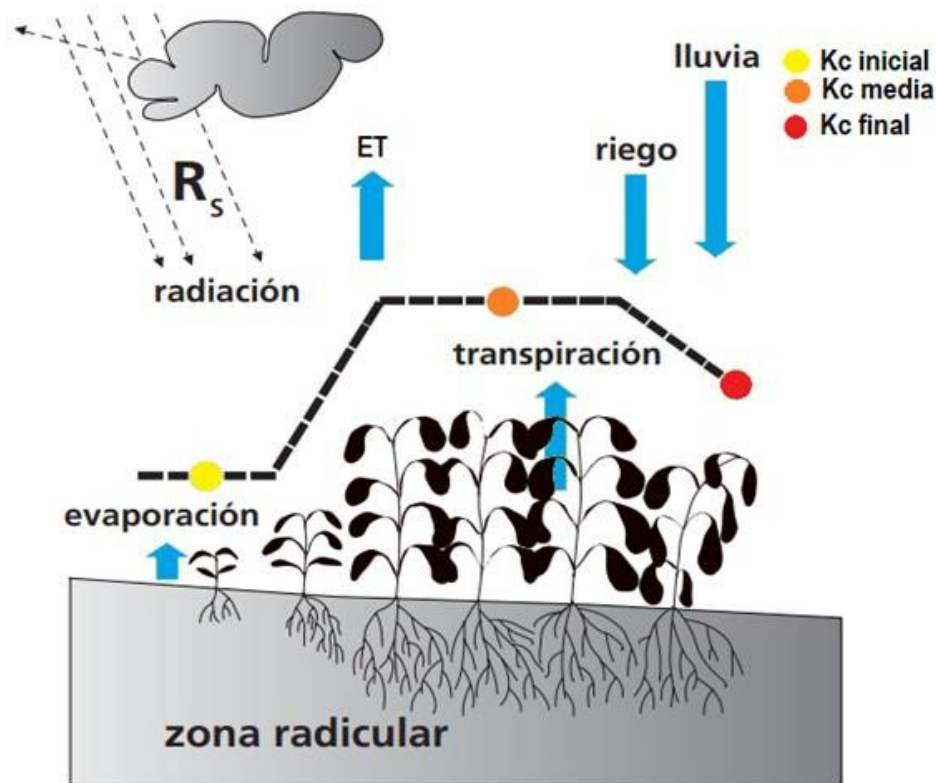


Figura 9. Esquema Evapotranspiración, adaptado Guía FAO 56 (FAO - UN, 2006).

2.3.1. Factores que afectan la evapotranspiración.

La evapotranspiración es un proceso natural que se encuentra determinado por múltiples factores dentro de estos podemos encontrar los siguientes:

Meteorológicos: dentro de estos parámetros se pueden encontrar la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento, sus relaciones se pueden ver en la Figura 9. El poder de evaporación de la atmósfera se expresa mediante evapotranspiración de referencia del cultivo o ET_0 .

Cultivo: la variedad, el tipo y la fase de desarrollo del cultivo, son aspectos relevantes al evaluar la ETP en cultivos que ocupan regiones extensas. Variables como la resistencia a la transpiración, la altura, la rugosidad, la reflexión, la cobertura del suelo y las características de enraizamiento pueden dar lugar a resultados variables en la estimación de la ETP, para diferentes cultivos bajo condiciones similares o idénticas (R. G. Allen et al., 1998)

Manejo y condiciones ambientales: Existen factores que pueden limitar el crecimiento de los cultivos, un exceso en la salinidad del suelo, la baja concentración de nutrientes, cantidades limitadas de fertilizantes, horizontes de suelo con características de dureza o impermeabilidad, bajo control de enfermedades y plagas, en general manejo del suelo del cultivo puede ocasionar una disminución en la ETP. Es importante además evaluar las prácticas de cultivo y el método de riego, ya que estos factores pueden incidir en el microclima, alterando las características del cultivo y su capacidad para absorber y/o retener agua. Se pueden considerar también factores adicionales como la cobertura, la densidad de plantas y el contenido de agua (R. Allen et al., 2006)

En este sentido la ETP dependerá de la magnitud del déficit de agua y el tipo de suelo, mientras que un exceso de agua provocará inundaciones afectando la raíz haciendo que esta absorba menos agua y así se inhiba el proceso de respiración. La recuperación de la cantidad de agua perdida por la ETP, se define como requerimiento de agua del cultivo y puede establecerse por diferencia entre la ETP y el valor de la precipitación efectiva (Samani, 2000). De esta manera el volumen de agua que será necesario para un cultivo determinado crezca y se desarrolle, se conoce como uso consuntivo de agua de riego o URC, este volumen será el que compense la diferencia entre la evapotranspiración potencial del cultivo y la cantidad aportada por la precipitación en un periodo de tiempo determinado. Para establecer el balance hídrico del cultivo de la siguiente manera:

$$URC = ETc - P - DS \quad (1)$$

URC = uso consuntivo del agua de riego (mm)

ETc = evapotranspiración potencial del cultivo (mm)

P = precipitación efectiva (mm)

DS = variación de la humedad del suelo (mm)

Tabla 2. Conceptos relacionados con la ETP, adaptado de método FAO-56 (R. Allen et al., 2006)

Evapotranspiración conceptos asociados	
Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET _o)	La tasa de ET de una superficie de referencia, que ocurre sin limitaciones de agua, es denominada como evapotranspiración del cultivo de referencia, ET _o . La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas.
Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET _c)	Se refiere a la evapotranspiración de cualquier cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo con las condiciones climáticas prevalecientes.
Coefficiente único del cultivo (K _c):	El coeficiente del cultivo K _c se obtiene, de la relación entre ET _o y ET _c , de la siguiente manera ET _c /ET _o . Expresando entonces que la evapotranspiración de referencia será igual a ET _c = K _c x ET _o
Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET _{c aj})	Hace referencia a la ET en cultivos cuyas condiciones ambientales y de manejo difieren de las estándar. En este caso la ET real puede desviarse de ET _c por factores como la presencia de plagas y enfermedades, salinidad del suelo, baja fertilidad y limitación o exceso de agua. Resultando en crecimientos menores de las plantas o menor densidad, lo que implica una disminución en la tasa de ET por debajo de los valores de ET _c .

La ETP no es un parámetro de medición simple. Su estimación experimental requiere de un conjunto de instrumentos, de mediciones precisas de variables físicas o el balance del agua del suelo haciendo uso de lisímetros. Estos métodos en campo, resultan costoso, demandando alta precisión en las mediciones (para evitar repeticiones que aumenten el gasto), requiriendo además de mano de obra calificada para su implementación.

2.3.2. Ecuación de Penman – Monteith para calcular la evapotranspiración

Debido a la ya mencionada limitación al momento de llevar a cabo mediciones precisas en el campo, la ET se suele estimar a partir de datos meteorológicos. A pesar de que existen una gran variedad de métodos con ecuaciones empíricas para determinar la ET_o y la ET_c , estos métodos responden sólo a una serie de condiciones climáticas y parámetros agronómicos particulares, lo que hace difícil su uso fuera de estas. El método Penman y Monteith es desde el punto de vista de la FAO, el más recomendado para la determinación de la ET_o con parámetros climáticos, ya que su estimación es bastante cercana en cualquier zona evaluada. En el caso de cultivos con condiciones no estándar este cálculo puede ser ajustado por medio de un coeficiente de estrés hídrico K_s o modificando el coeficiente de cultivo (Allen et al., 2006).

El método de Penman – Monteith para calcular la ET presenta la siguiente ecuación:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(Rn - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (2)$$

Donde:

Rn= Radiación Neta

G= flujo de calor del suelo

$(e_s - e_a)$ = déficit de la presión de vapor del aire

ρ_a = densidad media del aire a P cte

c_p = calor específico del aire.

Δ = pendiente de la relación entre temperatura, la presión de vapor y la saturación

γ = constante psicrométrica

r_s = resistencia superficial

r_a = resistencia aerodinámica

Los estudios realizados por la FAO comparando diferentes métodos confirman la sobreestimación y el desempeño variable en función de la adaptación a condiciones locales. El método Penman pueden requerir una calibración local de la función de viento para lograr resultados satisfactorios. A pesar de esto el uso de la ecuación 2 se recomienda por su base teórica y su ajuste de breves períodos. Sin embargo, los datos requeridos para completar este algoritmo a menudo no se encuentran disponibles para todas las regiones (R. G. Allen et al., 1998)

2.3.3. Ecuación de Hargreaves y Samani para calcular la evapotranspiración

Este método puede ser empleado para calcular la ET_0 en regiones donde la cantidad de datos climatológicos es limitada. Esta ecuación requiere de la estimación de la radiación solar y datos de temperatura. La radiación solar incidente, R_s , se evalúa a partir de la radiación solar extraterrestre (la que llega a la parte exterior de la atmósfera, que sería la que llegaría al suelo si no existiera atmósfera); ésta última aparece según los autores como R_0 ó R_a , y se pueden obtener en tablas que se encuentran en función de la latitud del lugar y del mes.

$$ET_0 = 0,0135 (T_{med} + 17,78) R_s \quad (3)$$

T_{med} es igual al promedio de la temperatura diaria y R_s será la radiación solar incidente

Samani en el año 2000 presenta un procedimiento para ajustar su ecuación del año 1982, permitiendo calcular la radiación solar incidente a partir de tablas tabuladas proponiendo la ecuación 4. Aunque, suele encontrarse referenciada en tablas dependiendo de la altitud y el mes, en la tabla del Anexo A. se encuentra un ajuste de la tabla de Allen que se hace de $MJ \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$; 1 mm/día (Sánchez San Román, 2017)

$$R_s = R_0 * K_T * (t_{max} - t_{min}) 0,5 \quad (4)$$

Donde:

R_0 = Radiación solar extraterrestre

K_T = coeficiente empírico

t_{max} = Temperatura máxima

t_{min} = Temperatura mínima

Al combinar la ecuación 4 con la ecuación original de Hargreaves y Samani (3) resulta una ecuación simplificada que solamente necesita temperatura y latitud

$$ET_0 = 0,0135 KT (t_{med} + 17,78) R_0 * (t_{max} - t_{min})^{0,5} \quad (5)$$

La ecuación 5 explica de manera explícita la radiación solar y la temperatura. Esta ecuación ha sido empleada arrojando buenos resultados en sitios en donde no se contaba con datos climatológicos suficientes para estimar la ET_0 . Los autores recomiendan emplear $KT = 0.162$ en regiones ubicadas en el interior y $KT = 0.19$ para regiones costeras (Samani, 2000) Allen (1995) recomienda emplear un factor de corrección para $KT = 0.17 (P / P_0)^{0.5}$ en regiones interiores y $KT = 0.2 (P / P_0)^{0.5}$ para las regiones costeras, considerando para este valor el cambio con respecto a la altitud y los efectos producidos por la cercanía a grandes volúmenes de agua, en capacidad calorífica volumétrica de la atmósfera, donde P se expresa como la presión media atmosférica mensual del sitio y P_0 la presión media atmosférica mensual a nivel del mar.

Sin embargo, no todas las regiones arrojan valores similares y los ajustes pueden llevar a subestimaciones importantes en la determinación de la radiación solar, por causa de la disminución en la diferencia de temperatura durante el cambio de altitud. Estudios emplearon datos meteorológicos de 65 estaciones ubicadas entre la latitud 7° y la 50° N en los Estados Unidos estableciendo que KT es una función del cambio en la temperatura. Por lo tanto, a medida que la diferencia de temperatura disminuye, la KT va de 0,13 a un valor de 0,24 representando una variación aproximada del 85%. Este estudio además establece que para ambientes en los que el cambio en la temperatura supera los 14°C la KT incrementa de forma repentina lo que podría traducirse en subestimaciones del valor de la ET_0 en climas secos. Otros ajustes hechos dentro del estudio de Samani lograron demostrar que este método, alcanzaba un error asociado del 15%, mejorando la estimación de Allen que mostraba un error máximo del 54% (Samani et al., 2009)

2.4. Ciencia de Datos

Se puede entender el concepto de dato como un conjunto de elementos, números u observaciones que son empleados para documentar información. En las últimas décadas el uso de los sistemas de información ha llevado a producir una gran cantidad de datos, expresados en una gran diversidad de estructuras y formatos. Las estructuras de los datos pueden representar categorías conocidas

como entidades, que juegan un papel importante a la hora de hacer clasificaciones. Estas entidades a su vez comprenden una serie de atributos o características. Los datos pueden clasificarse como estructurados, semiestructurados o no estructurados.

Se puede llamar estructurado al conjunto de datos que contiene un esquema fijo, es decir todos los datos poseen las mismas propiedades, su función principal es tabular o presentarse en forma de tablas en donde cada fila y cada columna representan los atributos específicos de una entidad. Estos datos son almacenados en bases de datos en los que las tablas pueden referenciarse entre sí, haciendo uso del modelo relacional. Por su parte los datos semi estructurados guardan alguna correlación entre sí, pero no todas las entidades tienen los mismos atributos, un formato muy usado para la notación de datos de esta categoría es la Notación de Objetos de JavaScript (JSON). En el último caso los datos no estructurados se pueden encontrar en forma de imágenes, video, documentos, archivos de audio y otros de estructura no específica (Microsoft, 2022)

La capacidad de guardar, registrar, y analizar datos es una demanda del mercado cada vez más creciente, la ciencia de datos combina múltiples campos, como las estadísticas, los métodos científicos, la inteligencia artificial (IA) y el análisis de datos, comprende la preparación, la depuración, la agregación y la manipulación de los datos para realizar análisis avanzados. Las aplicaciones analíticas y los científicos de datos pueden revisar los resultados para descubrir patrones y tendencias que permitan influir en la toma informada de decisiones. Esta disciplina se encarga de la transformación de los datos en información útil, tomando información desde fuentes variadas traduciendo datos cualitativos y cuantitativos de manera que sean comprendidos por el usuario final.

Las tareas comprenderán cinco pasos básicos que consisten primero en extraer los datos de la fuente principal que pueden ser páginas web, archivos de valores separados por comas (csv), o interfaces de programación de aplicaciones (API). Posteriormente hacer una depuración inicial con el fin de limpiar y obtener una base de datos sin errores. Luego se debe proceder a procesar los datos científicos obtenidos usando la estadística para ciencia de datos, en caso de ser necesario se construirán nuevas metodologías para procesar los datos científicos (algoritmos de programación). Finalmente, los resultados son presentados de manera gráfica, atractivas y comprensibles visualmente para el usuario (Salinas, 2017) ver fig. 10).

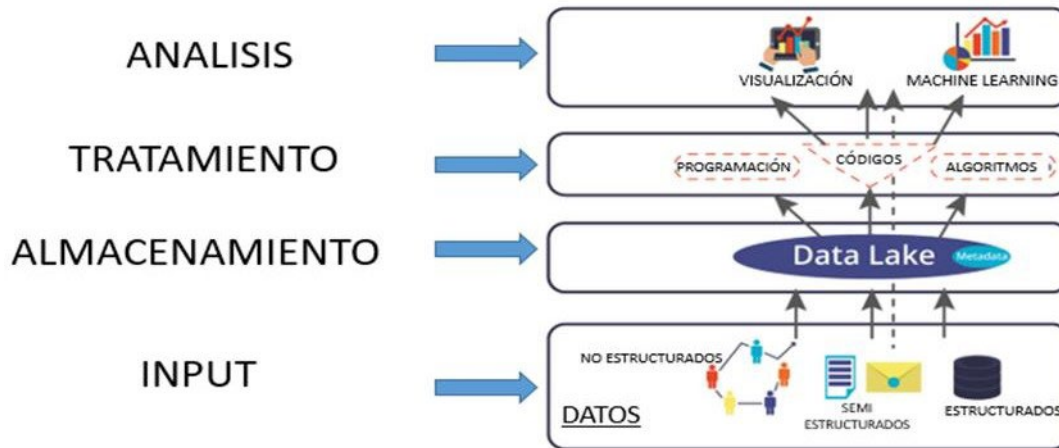


Figura 10. Mapa de procesamiento y arquitectura de datos en la construcción de Apps
(Adaptado Rastogi, 2019)

2.4.1. Bases de datos SQL y NoSQL

Las bases de datos son el fundamento de todas las aplicaciones, una base de datos es una colección organizada de información, estructurada para que se pueda acceder y gestionar fácilmente. Los datos se administran a través de un sistema de gestión de base de datos (Data Base Management System o DBMS). Existen dos tipos de bases de datos, las relacionales o (SQL structured query language) y las no relacionales. Las primeras funcionan bien con datos estructurados, su uso suele referirse al almacenamiento y consulta, estos datos se encuentran en forma de tablas en las que a cada entidad se le asigna una clave única de identificación que le permite, normalizar los datos y eliminar duplicados, además de, relacionarse con entidades en otras tablas.

A diferencia de las bases de datos relacionales, los datos de una base de datos No-SQL (Not Only SQL) son más flexibles en cuanto a consistencia de datos y se han convertido en una opción que intenta solucionar algunas limitaciones que tiene el modelo relacional. Este tipo de bases de datos son más adecuados cuando lo que se busca es almacenar datos no estructurados o semiestructurados (García, 2003)

2.4.2. Machine Learning

El empleo de algoritmos matemáticos en el diseño y creación de modelos predictivos que apoyen la toma de decisiones a partir del análisis de los patrones presentados por un conjunto de datos, es

una de las herramientas empleada por los modelos de aprendizaje automático o machine learning (*ML*). Estos modelos son medidos y validados a partir de datos conocidos proporcionados por escenarios de aprendizaje específicos, con el fin de ajustar y entrenar el modelo con el paso del tiempo.

Los modelos predictivos se validan en comparación con datos conocidos, se miden mediante las métricas de rendimiento seleccionadas para escenarios empresariales específicos y, posteriormente, se ajustan según sea necesario. Este proceso de aprendizaje y validación se denomina entrenamiento. Mediante el reentrenamiento periódico, los modelos de aprendizaje automático mejoran con el tiempo (Microsoft®, 2022)

2.4.3. PowerBi de Microsoft

PowerBi (PBI), (*acrónimo de Bussiness Intelligence*) es un programa de Microsoft creado principalmente para responder a las necesidades de análisis de vastos volúmenes de datos provenientes de las empresas, este permite manejar un gran volumen de datos con origen en fuentes y formatos muy diversos como Excel, csv, texto, JSON, URL, servidores tipo SQL, PDF, entre muchas otras opciones, es una herramienta útil para evaluar la calidad de los datos y permite realizar transformaciones y depuraciones, para obtener bases de datos útiles en múltiples propósitos. La plataforma permite alimentar de forma continua la información, además de mostrar la estructura de los datos, identificando posibles fuentes de error en la estructura de la información, de una forma rápida, el procesamiento se logra fácilmente con conocimientos básicos de programación, obteniendo visualizaciones de las variables, y la relación de los datos por medio de la generación de medidas. Durante esta investigación PBI se empleó para la elaboración de las bases de datos con la información proveniente de la ER y la API de Sensoterra. El programa permitió la carga y la transformación de los datos para posteriormente generar medidas para calcular la ET0, la ETc con diferentes intervalos de tiempo; además, de la realización de las visualizaciones correspondientes al comportamiento de los diferentes parámetros analizados.(Sharabi Kesem et al., 2022)

2.4.4. Sensores de Humedad

El monitoreo en tiempo real de las condiciones del suelo, permite tener datos precisos para favorecer la toma de decisiones durante el periodo productivo de un cultivo, la planeación de los

periodos de riego, la optimización de los recursos hídricos entre otros (Velázquez et al., 2021). En el CeTraTecIA, se emplean sensores de humedad y temperatura distribuidos en diferentes zonas de los cultivos, conectados a una puerta de enlace LoRaWan. Este enlace funciona usando protocolos de bajo alcance y red amplia (Low Range Wide Area Network por sus siglas en inglés) en donde un computador puede servir como puerta de enlace entre los datos colectados por los sensores y la nube en la que estos serán almacenados con dos propósitos principales: realizar cálculos significativos en los datos del cultivo y consolidarlos en resúmenes para su posterior análisis e interpretación. Por otra parte, esta puerta de enlace funciona de forma independiente respondiendo a los períodos de interrupción de conexión, lo que garantiza continuidad en la disponibilidad de la información. La puerta de enlace o Gateway envía los datos desde los sensores a la nube, donde se calibran y se procesan. Los datos registrados por los sensores se envían al monitor Sensoterra o son recuperados desde su API para integrar los datos en los sistemas requeridos, obteniendo archivos en formato Excel o JSON (Sensoterra, 2023)



Figura 11. Izq. Equipo de enlace a la antena Gateway - Der. Centro de cómputo para transferencia de datos CeTraTecIA (Archivo: Granados Olivas, 2023)

Capítulo 3. Metodología

En esta sección se describe el desarrollo de este proyecto desde la obtención de los datos hasta el diseño de la arquitectura de la interfaz de usuario de la aplicación, el manejo de los datos obtenidos durante el desarrollo de este proyecto permite realizar mediciones en tiempo real sobre las condiciones agroclimáticas de la zona, permitiendo mejorar las prácticas sobre el uso eficiente del agua empleando la ciencia de datos. Se emplearon datos de la estación climatológica Rancho Reforma #4 del Laboratorio de climatología y calidad del aire de la UACJ (<http://cecatev.uacj.mx/Estacion04/>), ubicada en el Centro de Transferencia de Tecnología y de Inteligencia Artificial (CeTraTecIA) en Ascensión Chihuahua, así como la red de sensores de humedad y temperatura del suelo Sensoterra® tipo Single y Multidepth. Generando algoritmos de programación para predecir las necesidades de riego automatizados para un cultivo de Nogal, desarrollando la arquitectura de la interfaz de una aplicación web en la plataforma Figma.

En el diagrama que aparece a continuación se observa el esquema general de funcionamiento de la red de CeTraTecIA de la siguiente manera:

- 1) Red de sensores de humedad y temperatura del suelo de tipo single y multidepth, marca Sensoterra y estación meteorológica Davis Vantage Vue 6250, punto de captura y medición de las variables climatológicas como temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, horas de sol, humedad y temperatura del suelo a diferentes profundidades, entre otros.
- 2) Punto de conexión red LoRaWan, que conecta los sensores con la nube de datos desde este punto de almacenamiento del CeTraTecIA, los datos se descargan desde el sitio web del Laboratorio de Climatología y Calidad de Aire de la UACJ.
- 3) El proceso de extracción y transformación de datos se realizó en el programa PowerBi de Microsoft, para la conformación de bases de datos tipo SQL, respondiendo a los parámetros necesarios para satisfacer la ecuación de Hargreaves y Samani para el cálculo de la ETo y la ETc según lo establece la guía FAO-56.
- 4) Con los algoritmos de programación se generaron visualizaciones sobre el comportamiento de la ETo en tiempo real, así como el establecimiento del requerimiento de riego, con carga

de datos en simultáneo desde el CeTraTecIA y descarga desde cualquier lugar con acceso a la red.

- Finalmente, a partir de las transformaciones de datos hechas en PowerBi empleando la plataforma FIGMA, se diseñó la arquitectura de la interfaz de usuario de una App web para medir la necesidad hídrica del cultivo de nogal y la predicción del riego basado en los datos.

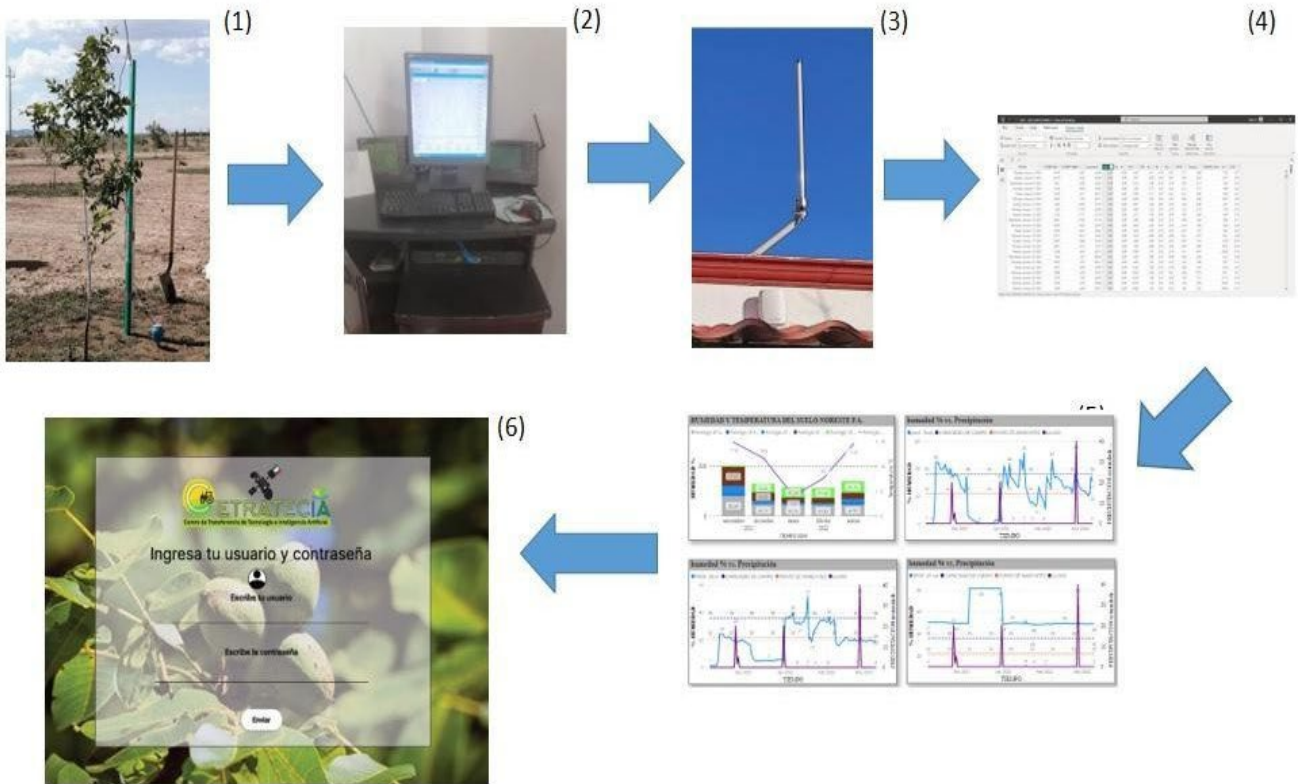



Figura 12. Diagrama General Metodología de trabajo. Fuente: CeTraTecIA, 2021

3.1.1. Construcción de bases de datos digitales para el cálculo de la ET con la ecuación de Hargreaves y Samani.

El centro de Transferencia de Tecnología y de Inteligencia Artificial (CeTraTecIA) se ubica en el municipio de Ascensión, Chih., que actualmente cuenta con 3.8 Ha cultivadas con Nogal Pecanero exhibiendo las características que se describen en la tabla 3, es un cultivo relativamente joven que aún no alcanza su etapa de maduración y producción.

Tabla 3. Características del cultivo de Nogal Pecanero, Rancho el Regalo

NOGAL PECANERO:	
	<p>Variedad: Wichita – Western 2 : 8</p> <p>Ciclo vegetativo: de marzo a septiembre</p> <p>Densidad: 100 árboles por hectárea (distribución 10m x 10m)</p> <p>Tecnología de riego: por micro aspersion</p> <p>Vol. por aspersor: 36lph x24h de riego</p> <p>Ahorro en el riego: 28 – 30%</p> <p>Volumen bruto por ciclo por hectárea = 16 248 m³</p> <p>área de riego Actual: 3.8 has</p> <p>Vol. total de riego para el ciclo marzo – octubre 2023: 46036 m³/año</p>

El cultivo de Nogal se encuentra monitoreado por la estación meteorológica RR y cuenta con sensores de humedad que monitorean el suelo de forma continua, inicialmente empleo sensores de tipo single y multidepth, que registraban datos de humedad y temperatura, actualmente cuenta con sensores Dragino que monitorean humedad, temperatura y además pH. Tanto la estación meteorológica como la red de sensores alimentaron las bases de datos construidas para este proyecto.

3.1.2. Extracción de Datos

La estación climatológica RR se encuentra ubicada en Ascensión, Chihuahua en la latitud: 31° 38.00' N; longitud:106° 33.00' W a una Altitud de 1200 metros, actualmente en funcionamiento, cuenta con un modelo Davis Vantage Vue 6250, con sensores de humedad, temperatura, colector

de lluvia y anemómetro, monitorea de manera permanente las variaciones climáticas de la zona, con actualizaciones cada 10 segundos (Wicaksana, 2016) ver figura 13.



Figura 13. Estación climatológica Modelo Davis Vantage Vue 6250 (CeTraTecIA)

En la tabla 4 Se puede observar la resolución, la sensibilidad y el rango de medición para la temperatura externa, que fue empleada para el cálculo de la ET_0 con la ecuación simplificada de Samani (ec. 5). Se pueden obtener y visualizar los registros climatológicos diarios en tiempo real desde enero de 2021 ver Figura 14, Estos registros se pueden descargar del sitio web del Laboratorio de Climatología y Calidad del Aire de la UACJ. <http://cecatev.uacj.mx/Estacion04/>.

Tabla 4. Resolución, Rango y precisión Sensor de Temperatura Estación
Modelo Davis Vantage VUE 6250

Variable	Resolución	Rango	Precisión
Temperatura Interna	0.1°F	+32°F - +140°F	0.5°F
	0.1°C	0°C - +60°C	0.3 °C
Temperatura Externa	0.1°F	-40 °F - +150°F	1°F
	0.1°C	-40°C - +65°C	0.5°C

Los datos son obtenidos en forma de archivos con valores separados por comas o csv, y cargados al programa Power BI, obteniendo un conjunto específico de datos estructurados en los que los registros y atributos se depuraron y limpiaron para satisfacer la ecuación de Hargreaves y Samani para estimar la ETo promedio diaria, el coeficiente de cultivo Kc y la ETc del lugar (CECATEV UACJ, 2022).



Figura 14. Datos meteorológicos Estación Rancho Reforma Fuente (CECATEV UACJ, 2022)

3.1.3. Determinación de ET₀

Los datos se transformaron desde el editor de consultas de PowerBi, para ajustarlos a la Ec.5 de ET₀, según las siguientes descripciones para cada parámetro

$$ET_0 = 0,0135 KT (t_{med} + 17,78) R_0 * (t_{max} - t_{min})^{0,5} \quad (5)$$

Fecha - Hora

Formato Small Data Time: ddmmaaHHmmss, Los registros se guardan cada 5 minutos.

Tmax : Temperatura externa diaria máxima medida en °C -Esta es la temperatura promedio más alta por día, por mes durante todo el periodo de recolección de datos.

Tmin= Temperatura externa diaria mínima medida en °C -Esta es la temperatura promedio más baja por día, por mes durante todo el periodo de recolección de datos.

Tmed = Temperatura externa media diaria en °C - Se realizó el cálculo a partir de las temperaturas promediadas máxima promedio menos mínima promedio.

$$Tmed = Tmax - Tmin$$

R₀ = Radiación solar extraterrestre en mm/día (valor ajustado ver Anexo A)

KT = 0.162 en regiones ubicadas en el interior (Samani, 2000b).

ET₀= cálculo de la ET empleando la ecuación de Samani

Para la estimación de la ET₀, con la ecuación de Samani solo se requieren las variaciones en la temperatura, la constante KT y el valor de radiación solar R₀. Con los registros de la ER obtenidos a intervalos de 5 minutos, se calcularon las temperaturas máximas (T_{max}) y mínimas (T_{min}), así como el valor promedio por día (T_c). Posteriormente se programó la ecuación para datos limitados de Hargreaves y Samani en el programa PowerBI, empleando como valor de KT 0.162 propuesto para regiones en el interior y para la radiación solar R₀, se toma de la tabla radiación solar extraterrestre en mm/día, el promedio para latitudes entre 30° y 32° para cada mes, en el Hemisferio norte (R. G. Allen et al., 1998). Obteniendo los resultados de la ET₀ a partir de la ecuación simplificada de Hargreaves y Samani 2000. Ec. 6

$$ET_0 = 0,0023 (t_{med} + 17,78) R_0 * (t_{max} - t_{min})^{0,5} \quad (6)$$

3.1.4. Extracción datos humedad del suelo

Análisis de textura de suelo y calibración de los sensores: En un estudio previo realizado en el año 2020 se tomaron muestras de 4 diferentes puntos del sembradío seleccionados a conveniencia de la investigación y se determinó la composición del suelo estaría distribuida de la siguiente manera (Galaviz Aragonés, 2022)



Figura 15. Mapa muestreo para análisis de textura de suelos

Tabla 5. a. Características de las texturas de suelo adaptado CeTraTecIA (Galaviz Aragonés, 2022)
b. contenido volumétrico de agua en el suelo para la calibración de los sensores Sensoterra, adaptado Sensoterra.com

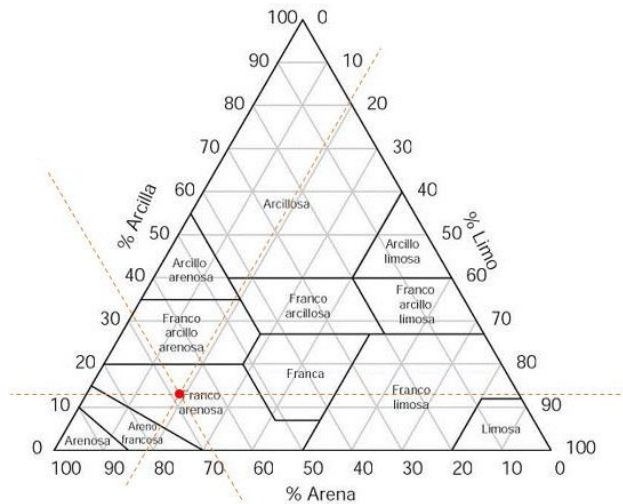
TEXTURA DEL SUELO

Clasificación de suelos: Franco Arcillo Arenoso – Franco Arenoso

Este tipo de suelos contienen una cantidad significativa de arcilla, limo y arena. Dando como resultado un suelo con buena estructura, con una buena capacidad de retención de agua y nutrientes. Los suelos franco arenosos tienen un porcentaje más alto de arena que los suelos francos. Sin embargo, sus capacidades de retención de agua son inferiores en comparación con los suelos francos. Por su parte Los suelos franco arcillosos arenosos tienen un porcentaje menor de limo que los suelos francos, lo que da como resultado una estructura ligeramente inferior pero una mejor capacidad de retención de agua en comparación con los suelos francos (Sensoterra, 2023)

ANÁLISIS TEXTURA DE SUELO

Clasificación de suelo: Franco Arenoso



SUELO FRANCO ARENOSO

COMPOSICIÓN

Arena= 68%

Limo= 19%

Arcilla= 13%

Materia Orgánica: 7.2%

**SUELO FRANCO ARCILLO
ARENOSO**

COMPOSICIÓN

Arena= 59.14% o 59%

Limo= 18.87% o 19%

Arcilla= 21.99% o 22%

Materia orgánica: 12.2%

b.
CONTENIDO VOLUMETRICO DE AGUA

Calibración de Sensores Sensoterra

Para la calibración de los sensores se emplearon los parámetros establecidos según la guía de suelos de la USDA

Capacidad de campo FC: 53%

Punto de marchitez permanente WC:
25%

<p>Volumetric Moisture Content (%) Sandy Clay Loam 1</p> <p>100 90 80 70 60 50 40 30 20 10 0</p> <p>Solid fraction</p> <p>Saturation point 53% (pF0)</p> <p>Field capacity 43% (pF2)</p> <p>Healthy irrigation point 31% (pF3.3)</p> <p>Wilting point 25% (pF4.2)</p> <p>Too dry</p>	<p>Punto de ajuste alto: 43%</p> <p>Se usa un FC (pF2) con el fin de prevenir sobre-riego y por consiguiente pérdidas de nutrientes o insumos</p> <p>Punto de ajuste bajo: 31%</p> <p>Se usa un punto de riego (pF3.3), para así evitar el estrés en la planta por falta de agua.</p>
<p>Volumetric Moisture Content (%) Sandy Loam 2</p> <p>100 90 80 70 60 50 40 30 20 10 0</p> <p>Solid fraction</p> <p>Saturation 48% (pF0)</p> <p>Field capacity 36% (pF2)</p> <p>Healthy irrigation point 22% (pF3.3)</p> <p>Wilting point 17% (pF4.2)</p> <p>Too dry</p>	<p>Capacidad de campo FC: 48%</p> <p>Punto de marchitez permanente WC: 17%</p> <p>Punto de ajuste alto: 36%</p> <p>Se usa un FC (pF2) con el fin de prevenir sobrerriego y por consiguiente pérdidas de nutrientes o insumos</p> <p>Punto de ajuste bajo: 22%</p> <p>Se usa un punto de riego (pF3.3), para así evitar el estrés en la planta por falta de agua.</p>

3.2. Programación de algoritmos para producir calendarios de riego en tiempo real, a partir de la evapotranspiración y el balance hídrico del cultivo por medio de la IA en la agricultura.

A partir de la construcción de las bases de datos de tipo SQL con las variables climatológicas y la humedad del suelo, se obtuvieron archivos de texto (csv, txt) para cada año y cada parámetro (ET y Humedad) la extracción y transformación de los datos se realizó en el programa PowerBi, donde

se obtuvieron las visualizaciones de la ET0, las variaciones climáticas durante este tiempo y el comportamiento de la humedad y la temperatura en el suelo durante los meses de noviembre 2021 a marzo de 2022, actualmente se siguen cargando y analizando los datos climatológicos del año 2023. Estos datos nos permiten obtener el balance hídrico del cultivo y los requerimientos de riego teniendo en cuenta la demanda hídrica calculada a partir de la Kc.

3.2.1. Determinación del Balance Hídrico y el requerimiento de riego para los cultivos de Nogal
 Teniendo en cuenta el desarrollo del nogal y la importancia que representa el riego adecuado en cada uno sus etapas fenológicas, ver tabla 5. Durante los últimos años en el Rancho el Regalo se han regado las 3.8 has con el sistema de riego por micro-aspersión en el que cada aspersor arroja un volumen de 34lph, siguiendo los parámetros mostrados en la figura 16. Durante el periodo activo de marzo a octubre. Cada árbol cuenta con un radio de 1m², con una densidad total de 100 árboles por hectárea lo que arroja una lámina neta de consumo 46036 m³ por ciclo. Ver Anexo B.

Tabla 6. Fenología del Nogal pecanero adaptado Sifuentes (Sifuentes Ibarra et al., 2015)

Etapa	Fechas	Días
<i>BROTACIÓN</i>	25 de marzo al 10 abril	15
<i>FLORACIÓN masculina</i>	17de abril al 5 de mayo	17
<i>FLORACIÓN femenina</i>	20 abril 5 mayo	15
<i>POLINIZACIÓN Y FECUNDACIÓN</i>	25 de abril al 15 de mayo	20
<i>CRECIMIENTO FRUTO</i>	20 mayo al 10 agosto (72)	72
<i>LLENADO ALMENDRA</i>	3 agosto al 19 de septiembre	47
<i>APERTURA DEL RUEZNO</i>	21 de septiembre al 19 de octubre	28
<i>DURACIÓN TOTAL DEL CICLO</i>	-----	207

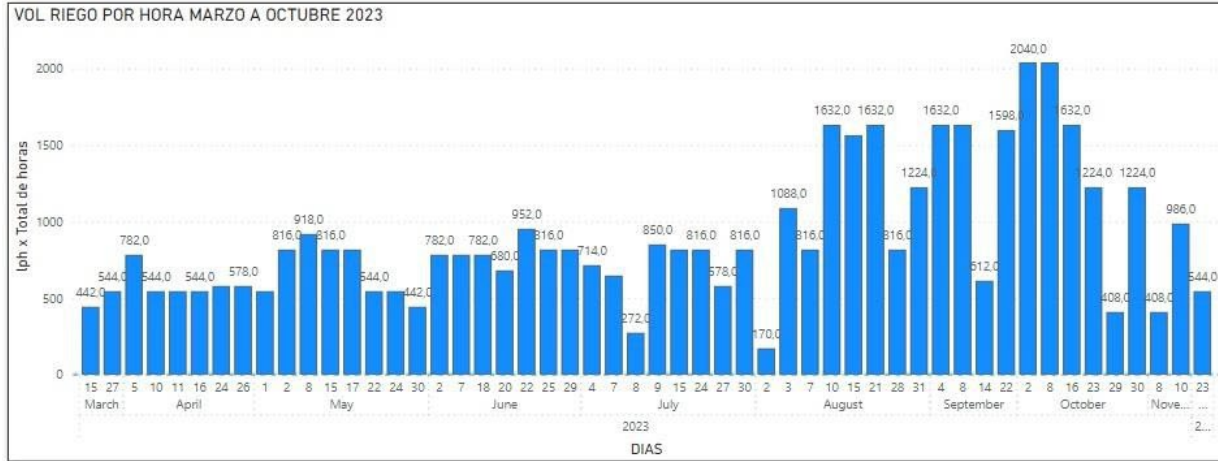


Figura 16. Calendario de riego Rancho Reforma 2023

Para establecer un volumen aproximado del agua de riego para el cultivo de Nogal Pecanero en el CeTraTecIA, se calcula la ET₀ empleando los parámetros climatológicos que satisfacen la ecuación de Hargreaves-Samani (Ec. 5), colectando datos de la estación meteorológica RR.

3.2.2. Determinación de ET_c

La ET_c, es calculada a partir del valor establecido para el coeficiente único de cultivo K_c, este coeficiente es recomendado cuando se tienen mayor cantidad de datos con periodicidad diaria ya que pueden ser fácilmente adaptados a sistemas computacionales de datos. El coeficiente de cultivo puede expresarse como la relación entre ET_c/ET₀. En la tabla 7. Se pueden observar algunos valores estimados por la FAO define estos valores teniendo en cuenta la fenología del cultivo en este caso se emplea para la K_c inicial, el valor asignado a los cultivos que aún no alcanzan el 10% de la cobertura del suelo, los valores de ET₀ entre 0 – 3 mm/día y 0.6 para valores de ET₀ entre 3 -5 mm/día, con frecuencia de riego menos de una vez por semana de la tabla 2(FAO - UN, 2006). Se programa una nueva medida para calcular ET_c a partir de ET₀ empleando la ecuación 7.

$$ET_c = ET_0 * K_c \quad (7)$$

Tabla 7. Valor promedio de K_c ini según el valor de ET₀ y el intervalo de tiempo entre riegos o lluvias en el tiempo de crecimiento inicial, para cualquier tipo de suelo. (Tomado FAO 56)

Frecuencia de riego x semana	ET ₀ bajo 1-3	ET ₀ medio 3-5	ET ₀ alto 5-7
------------------------------	--------------------------	---------------------------	--------------------------

Menos de 1 vez	1,2 - 0,8	1,1 - 0,6	1,0 - 0,4
1 vez	0,8	0,6	0,4
Más de una vez	0,7 - 0,4	0,4 - 0,2	0,3 - 0,2

Se determina el valor de Kc en las diferentes etapas fenológicas para establecer los requerimientos de riego del cultivo de la siguiente manera.

- Se identificaron la duración de las etapas fenológicas del cultivo tomando los valores de Kc de la guía 56 de riego y drenaje para el método gráfico.
- Se construyó la curva de coeficiente Kc, para el presente estudio se emplearon los coeficientes calculados por (Goldhamer, 2002), para cultivos de Nogal en la región del Norte de México.

Tabla 8. Coeficientes de cultivo de Nogal Kc. Adaptado Goldhamer, 2002

<i>Kc Nogal Pecanero</i>		
<i>Marzo 16-31</i>	1	<i>0,12</i>
<i>Abril 1-15</i>	30	<i>0,53</i>
<i>Abril 16-30</i>	45	<i>0,68</i>
<i>Mayo 1-15</i>	60	<i>0,79</i>
<i>Mayo 16-30</i>	75	<i>0,86</i>
<i>Junio 1-15</i>	90	<i>0,93</i>
<i>Junio 16-30</i>	105	<i>1,00</i>
<i>Julio 1-15</i>	120	<i>1,14</i>
<i>Julio 16-30</i>	135	<i>1,14</i>
<i>Agosto 1-15</i>	150	<i>1,14</i>
<i>Agosto 16-30</i>	165	<i>1,14</i>
<i>Sep 1-15</i>	180	<i>1,08</i>
<i>Sep 16-30</i>	195	<i>0,97</i>
<i>Oct 1-15</i>	210	<i>0,88</i>
<i>Oct 16-30</i>	225	<i>0,51</i>
<i>Nov 1-15</i>	240	<i>0,28</i>

Para estimar el valor de Kc inicial, Kc media y Kc Final por el método gráfico se obtuvo el coeficiente de cultivo para el cultivo de nogal de la siguiente manera.

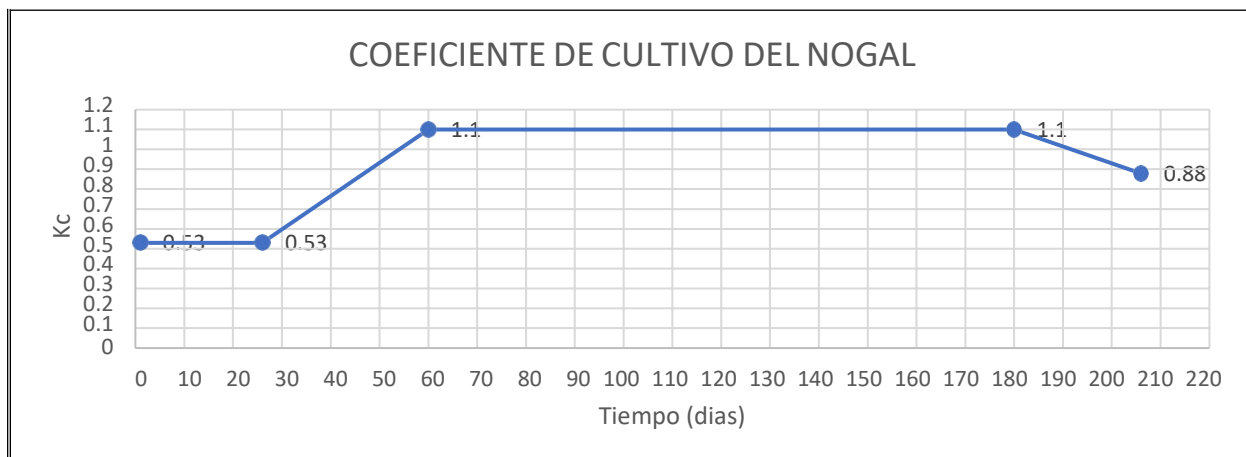


Figura 17. Kc Coeficiente de cultivo para nogal

3.3. Construcción de la interfaz de usuario para la plataforma de Riego en tiempo real para cultivos de Nogal en el programa FIGMA

El diseño de producto para esta interfaz de usuario se basa en las etapas de pensamiento de diseño, considerando las características del usuario final, el tipo de herramienta que se busca desarrollar el origen de los datos, las visualizaciones, la personalización y la facilidad del usuario para interactuar con esta (Sian & Dam, 2022). Previamente se mencionaron las necesidades de los agricultores locales frente a las necesidades de optimizar las condiciones de riego para los cultivos, para responder a esta demanda el CeTraTecIA, propone hacer uso de las herramientas del IoT, para lograr una automatización del proceso de riego basado en datos recolectados en tiempo real. La interfaz de usuario cuenta con un listado de requerimientos basados en la experiencia del autor durante la elaboración de la presente investigación. La figura 18. muestra los requerimientos de cada interfaz para la posterior programación de la aplicación web para riegos de nogal.

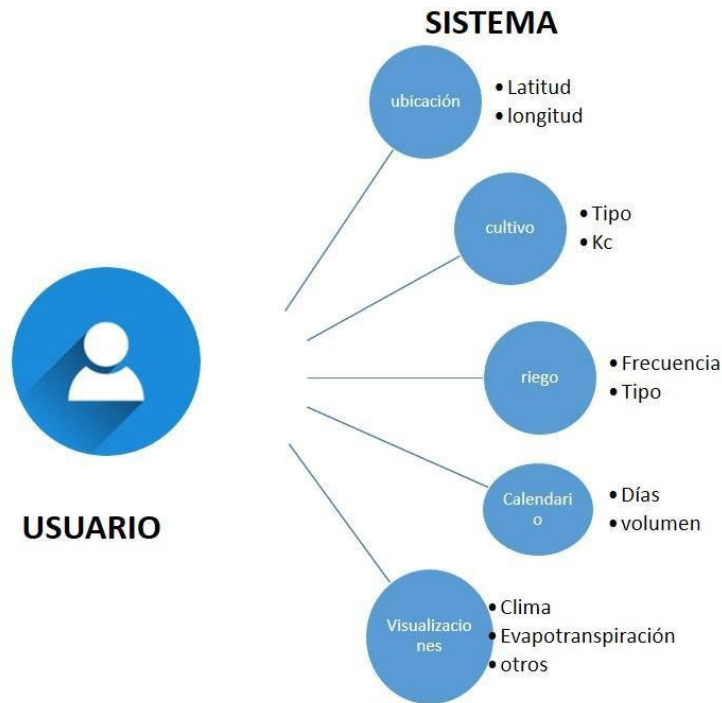


Figura 18. Mapa de requerimientos interfaz IrrigationData App

3.3.1. Interfaz IrrigationData App

Se establecen algunos requerimientos para el diseño de la arquitectura de la interfaz de usuario, esta etapa es fundamental para definir el lenguaje de programación y las necesidades de la etapa de prototipo y prueba.

Requerimiento 1. El usuario podrá tener acceso a la interfaz por medio de un usuario y contraseña.

Requerimiento 2. El usuario proporciona entradas de información/datos como son latitud, longitud, tipo de riego.

Requerimiento 3. El usuario podrá visualizar una tabla con la ubicación de sus sensores y los datos de humedad diaria, así como la frecuencia sugerida para el riego.

Requerimiento 4. El usuario tiene acceso a un panel de visualización con un menú de navegación para poder acceder a gráficas sobre el clima con variables como temperatura, viento, humedad del aire, variaciones en la humedad del suelo, registro histórico de los parámetros por mes, día año

A continuación, se encuentra la estructura propuesta para las diferentes tablas de la interfaz de riegos en tiempo real para cultivos de nogal, para el programa FIGMA

ENTRADA

USUARIO

CONTRASEÑA

El usuario deberá ingresar empleando un usuario y contraseña generados previamente.

Para poder continuar, se requiere completar esta información

LATITUD

LONGITUD

ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA

TIPO DE RIEGO

TEXTURA DE SUELO

- Arcilloso
- Limoso
- Arenosos
- Francos Arcillo Arenoso
- Franco Arenoso
- Franco
- Franco Limoso
- Franco Arcillo Limoso
- Salinos

El usuario proporcionará información sobre su localización, para poder conectar la base de datos a NASA POWER o a la estación Reforma, donde se obtendrán las variables climatológicas temperatura máxima, mínima, media y precipitación para satisfacer los demás requerimientos de la plataforma como son los algoritmos para calcular ET0 y realizar el balance de hídrico, el tipo de riego y la textura de suelo predominante en el cultivo.

CLIMATOLOGIA

MENÚ UNIDADES



Lluvia: mm/día

-m³/mes

ET0 = mm/día

-m³/mes

VARIABLES:

- DATE
- T max.
- Tmin.
- Tmed.
- Lluvia
- ET0

AÑO	MES	T. MAX	T. MIN	T. MED	Lluvia	ET0

Se espera que el usuario seleccione las unidades requeridas, para las diferentes variables temperatura, precipitación, ET0 y obtenga una relación de los datos seleccionados en forma de tabla.

VISUALIZACIONES

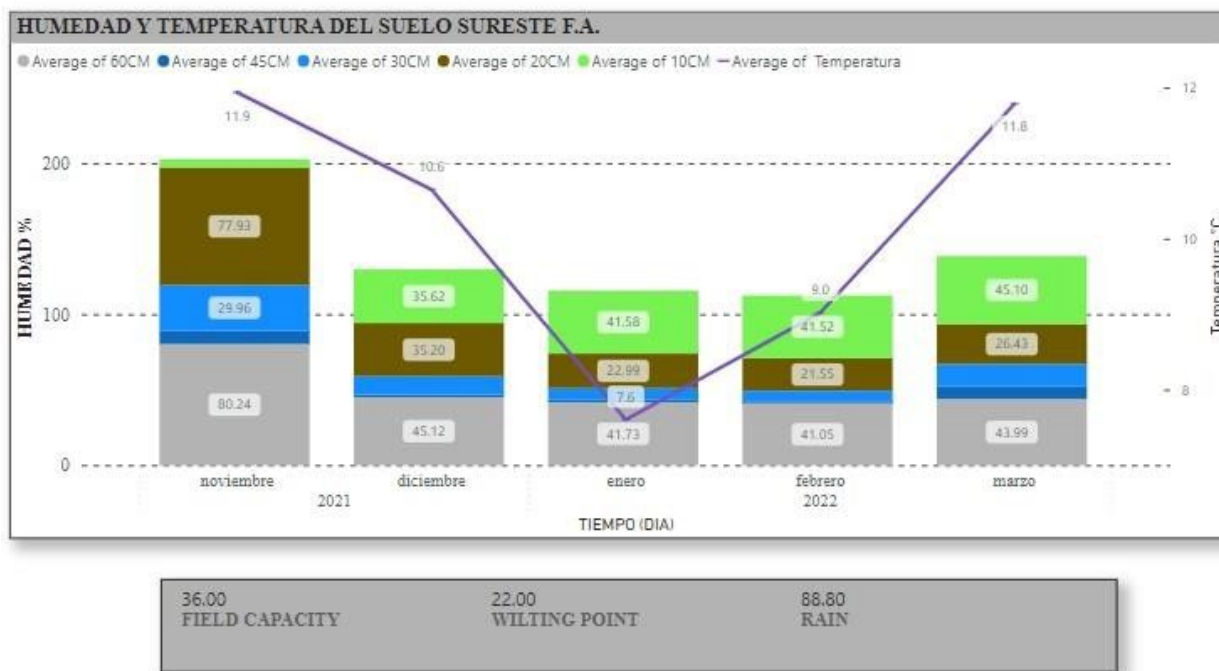
- TEMPERATURAS VS. TIEMPO (EJEM)
- ET0 VS TIEMPO
- PRECIPITACIÓN VS TIEMPO

El usuario podrá visualizar comportamiento de las variables con respecto al tiempo en diferentes escalas meses, días, año. Seleccionado la visualización en el menú de opciones.

SENSORES HUMEDAD

Para la visualización de los sensores de humedad, el usuario podrá seleccionar el sensor y las variables como temperatura, promedio de la humedad del suelo a diferentes profundidades, tiempo en días.

- Sensor Nogales Noroeste
- Sensor Suroeste
- 2 Sensor Sureste



Previamente el usuario deberá instalar sensores de humedad en el cultivo con la calibración necesaria según la textura de suelo, se podrá observar el comportamiento de la humedad en el suelo del sensor seleccionado en forma de tabla o de manera gráfica. Generando una alerta que indique cuándo regar o detener el riego según el porcentaje de humedad en el suelo.

REQUERIMIENTO DE RIEGO

- Fecha Requerimiento de riego
- Caudal
- Humedad suelo

Fecha	INTERVALO días	Requerimiento riego	Caudal
		m3/dia/Ha	m3/h

Este proyecto busca fomentar el uso de la IA en la agricultura, por lo que los usuarios de la plataforma deberán contar con requerimientos técnicos en su cultivo como los sensores de

humedad y temperatura del suelo. Con la intención de proporcionar una fuente de datos en tiempo real que permita el funcionamiento de la plataforma según los parámetros programados.

3.4. Análisis estadístico

Los datos registrados para temperatura, humedad, velocidad del viento y la ET0 calculada, fueron analizados con parámetros de estadística descriptiva, calculando medidas de tendencia central y dispersión de datos, los promedios obtenidos se estandarizaron y adicionalmente, se realizó un análisis del coeficiente de determinación r , para medir la bondad del ajuste del modelo y así establecer la relación entre la ET0 y las variables climáticas empleadas. Para realizar los cálculos y gráficos se utilizó el programa PowerBi, hojas de cálculo de Excel y la plataforma de código abierto Jupyter Notebook para Python.

Para la estandarización ajustamos los datos para que aproximar la media (Z_i) a 0 y la desviación estándar a 1 con el fin de hacerlos comparables tanto en distribución como en variabilidad para lo cual ajustamos los datos obtenidos de las medias mensuales para las variables, ET0 acumulada por mes, ETc acumulada por mes, humedad relativa promedio por mes, lluvia acumulada por mes y velocidad del viento promedio por mes, usando las ecuaciones 7 y 8.

$$Z_i = \frac{x_i - X_{med}}{\sigma} \quad (7)$$

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

Capítulo 4. Resultados y Discusión

4.1. Extracción y transformación de Datos

La estación RR registró la información climatológica de la zona casi de forma ininterrumpida durante el periodo de tiempo monitoreado enero a diciembre de los años 2021- 2023. La base de datos necesaria para este estudio, se estructuró con las variables correspondientes a fecha, hora, temperatura externa, humedad relativa, lluvia, y velocidad de viento como se observa en la figura 20.

La transformación de datos se realiza en primera instancia para mejorar la calidad de los datos, en cada columna se visualiza una caja de distribución permite detectar el porcentaje de datos válidos, datos erróneos y/o vacíos que existen en la fuente principal de datos; Teniendo en cuenta, que los archivos csv tienen un total de 105120 Filas y 89 columnas, visualizar esta información permite llevar a cabo tareas de transformación y limpieza de datos mejorando la calidad de la base de datos, obteniendo finalmente una matriz con un total de 11 columnas y 728 filas ver figura 19.

FECHA	#TEMP MJ	#TEMP MIN °C	humedad	rain	Ra	%	Su2	ETO	Kc	Etc	#ETO	Tmean	VIENTO 10m	ETR
Monday, January 4, 2021	16.78	-3.40	32.96	0.00	8.36	5.42	2.17	0.10	0.21	2.11	6.69	7.25	0.21	
Tuesday, January 5, 2021	20.72	-4.28	32.08	0.00	8.36	7.01	2.50	0.10	0.25	2.50	8.22	9.37	0.25	
Wednesday, January 6, 2021	14.91	-4.56	30.65	0.00	8.36	5.73	1.94	0.10	0.19	1.95	5.17	7.65	0.19	
Thursday, January 7, 2021	17.49	-9.96	30.83	0.00	8.36	3.36	2.17	0.10	0.22	2.17	3.77	4.49	0.22	
Friday, January 8, 2021	16.76	-4.77	29.15	0.00	8.36	3.96	2.12	0.10	0.21	2.12	6.00	5.29	0.21	
Saturday, January 9, 2021	20.82	-7.55	26.71	0.00	8.36	10.38	2.50	0.10	0.25	2.50	6.64	13.87	0.25	
Sunday, January 10, 2021	6.83	-6.65	57.75	0.00	8.36	6.97	1.26	0.10	0.13	1.26	0.09	9.31	0.13	
Monday, January 11, 2021	6.32	-11.78	62.29	0.00	8.36	5.46	1.23	0.10	0.12	1.23	-2.73	7.29	0.12	
Tuesday, January 12, 2021	11.02	-11.77	51.73	0.00	8.36	4.17	1.59	0.10	0.16	1.60	-0.38	5.57	0.16	
Wednesday, January 13, 2021	16.81	-11.93	37.18	0.00	8.36	2.88	2.08	0.10	0.21	2.09	2.44	3.85	0.21	
Thursday, January 14, 2021	19.95	-4.56	25.79	0.00	8.36	4.69	2.42	0.10	0.24	2.43	7.69	6.26	0.24	
Friday, January 15, 2021	18.58	-4.04	25.62	0.00	8.36	4.36	2.29	0.10	0.23	2.29	7.27	5.82	0.23	
Saturday, January 16, 2021	23.91	-6.41	22.99	0.00	8.36	6.74	2.80	0.10	0.28	2.81	8.75	9.01	0.28	
Sunday, January 17, 2021	20.67	-5.86	23.26	0.00	8.36	4.68	2.49	0.10	0.25	2.50	7.41	6.26	0.25	
Monday, January 18, 2021	24.41	-5.13	19.15	0.00	8.36	7.64	2.86	0.10	0.29	2.87	9.64	10.22	0.29	
Tuesday, January 19, 2021	12.38	4.55	40.13	0.00	8.36	17.80	1.41	0.10	0.14	1.41	8.47	23.80	0.14	
Wednesday, January 20, 2021	6.62	2.67	88.39	0.00	8.36	4.09	0.86	0.10	0.09	0.86	4.64	5.47	0.09	
Thursday, January 21, 2021	10.33	3.79	89.13	0.00	8.36	4.39	1.22	0.10	0.12	1.22	7.06	5.87	0.12	
Friday, January 22, 2021	15.91	3.56	73.90	0.00	8.36	6.39	1.86	0.10	0.19	1.86	9.73	8.55	0.19	
Saturday, January 23, 2021	18.46	5.00	54.22	0.00	8.36	10.03	2.08	0.10	0.21	2.08	11.73	13.41	0.21	
Sunday, January 24, 2021	15.76	-1.52	64.55	0.00	8.36	16.26	1.99	0.10	0.20	1.99	7.12	21.74	0.20	
Monday, January 25, 2021	10.99	2.16	54.84	0.00	8.36	19.78	1.39	0.10	0.14	1.39	6.58	26.45	0.14	
Tuesday, January 26, 2021	8.06	-2.84	65.15	0.00	8.36	14.99	1.29	0.10	0.13	1.30	2.61	20.04	0.13	

Figura 19. Base de datos ER 2021 -2022 en PowerBi

Transformación de datos: La fecha se cambia de formato USA MMDDAAAHHmmss a Formato Latinoamérica DDMMAAAAHmmss, se ajustan los encabezados de las columnas según el tipo

de dato, fecha, hora, texto o decimal. A partir la columna temperatura se obtienen columnas calculadas con valores de temperatura máxima, mínima y promedio de los datos existentes para cada día. Se crea la columna Ra, correspondiente a la Radiación solar extraterrestre calculada a partir de la tabla de Allen calculando para cada mes un promedio entre los valores reportados para las latitudes 30 y 32 del hemisferio norte (Sánchez San Román, 2017)

Para cada día hay un total de 288 registros ya que los datos se actualizan cada 5mins, por lo que es necesario establecer los promedios de cada una de las columnas restantes como humedad y velocidad del viento, en el caso de los datos registrados para lluvia se hace en forma de suma de valores por día. El anemómetro de la estación RR se encuentra a una altura de 10m, por lo que se crea una nueva columna calculada para convertir la velocidad del viento a 2m como lo recomienda la guía 56 de riego y drenaje de la FAO. El cálculo de la ET₀ y la ET_c se describen a continuación.

4.2. Determinación de ET₀

Para programar la ecuación para el cálculo de ET₀ de Hargreaves y Samani se emplean los datos climatológicos, transformados de la estación de la ER en PBI. A partir de la temperatura externa se programan columnas para determinar los valores de temperatura mínima, máxima y la temperatura promedio de la siguiente manera:

Temperatura máxima = #TEMP MAX °C = `MAX('Dataset'[outTemp])`

Temperatura mínima = #TEMP MIN °C = `MIN('Dataset'[outTemp])`

Temperatura media = T PROMEDIO °C = `AVERAGE('Dataset'[outTemp])`

PBI genera visualizaciones con la periodicidad deseada, por año, mes o día, para efectos de este estudio se evaluaron estas variaciones a diario para los años 2021 y 2022 y se establecieron además promedios mensuales como los que se muestran a continuación en la Figura 20.

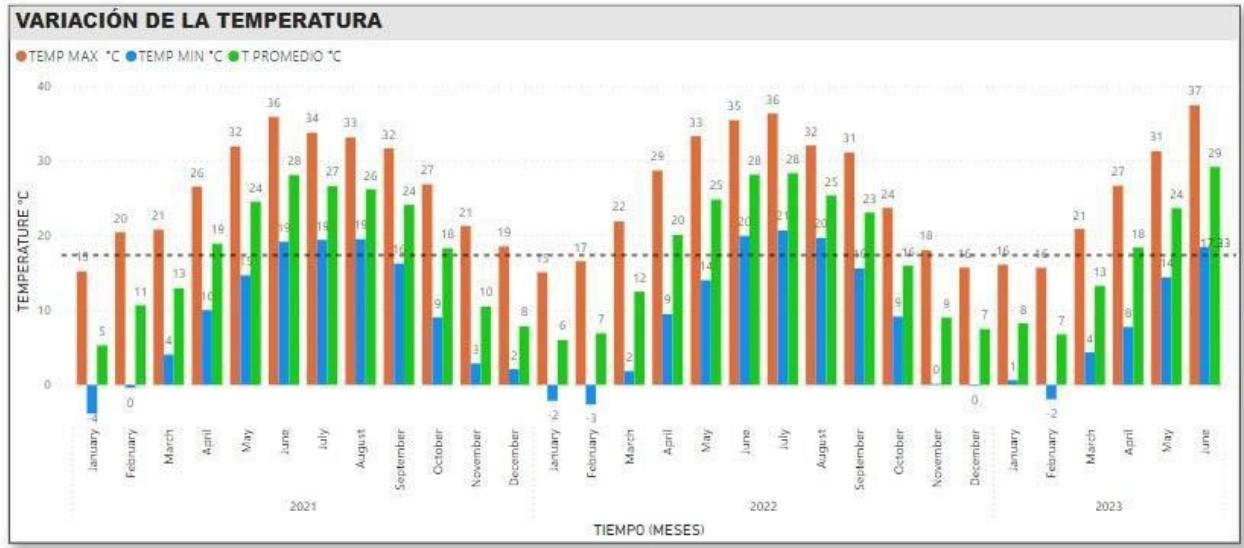


Figura 20. Monitoreo de las variaciones en la temperatura para la ER por mes, desde 2021-2023

Se observa un comportamiento similar en las variaciones de temperatura para los periodos de tiempo entre 2021 y junio de 2023, enero de 2021 presentó las temperaturas más bajas alcanzando una mínima promedio de -3.83 °C, mientras que para el 2022 febrero es más frío que enero con una mínima de -2.62 °C y - 1.9 °C para el mismo periodo en el 2023. Por otra parte, las temperaturas más alta se registran en julio alcanzando entre 40 - 41 °C, la temperatura máxima promedio para los periodos 2021 – 2023 es de 36°C. Se registra de esta manera una temperatura media anual de 17.93°C, los datos coinciden con los publicados por la página del CECATEV para los mismos periodos de tiempo, ver Fig. 21.

Una vez calculada la Tmin; Tmax y Tmedia, se programa la ecuación para ET₀, empleando la ec. 6, Donde KT= 0,162 y Ro se obtiene del promedio de los valores reportados en el Anexo A. De la siguiente manera, según el ajuste a la ecuación de Samani 2000. El algoritmo empleado en Power Bi es el que se muestra a continuación:

$$\#ET0 = (0.0023 * ('2021 DATASET MAY6'[Tmean]+17.78) * ('2021 DATASET MAY6'[Ra])) * (POWER('2021 DATASET MAY6'[#TEMP MAX °C] - '2021 DATASET MAY6'[#TEMP MIN °C], 0.5))$$

Temperatura mínima

°C	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2019	-	-	-	-	-	-	-	36.7	13.3	4.3	-	-
2020	-	-	0.2	-2.7	6.9	6.9	18.7	15.0	3.9	-4.7	-7.4	-11.9
2021	-6.8	-6.8	-7.2	-1.3	5.7	13.5	15.8	17.4	10.4	1.0	0.0	-5.2
2022	-1.1	-	-6.3	-0.3	6.0	12.8	18.8	16.6	9.1	-1.0	-	-
2023	-7.2	-9.9	-1.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-

MIN 2021: -11.9 JAN
MIN2022: -11.7 FEB

MED 2021: 18.3
MED 2022: DATOS INCOMPLETOS

Temperatura media

°C	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2019	-	-	-	-	-	-	-	36.8	22.7	19.3	-	-
2020	-	-	14.4	18.3	24.6	27.7	29.3	29.4	22.5	18.0	12.3	4.7
2021	5.3	10.7	12.9	18.9	24.4	28.0	26.6	26.1	24.1	18.4	13.9	10.0
2022	5.9	6.8	12.4	20.0	24.7	28.0	26.4	25.2	23.0	15.9	-	-
2023	6.0	7.8	13.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-

MAX 2021: 41.8
MAX 2022: 39.7

Temperatura Máxima

°C	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2019	-	-	-	-	-	-	-	36.8	32.3	29.6	-	-
2020	-	-	30.0	31.8	36.8	40.8	42.5	46.4	36.5	35.1	30.0	23.4
2021	24.4	26.3	28.3	31.9	35.6	41.8	38.1	37.7	36.4	32.7	28.3	24.8
2022	22.2	23.7	29.7	33.3	38.2	39.7	37.2	37.2	33.5	28.8	-	-
2023	20.4	25.1	27.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Figura 21. Registros temperatura mínima, media y máxima CECATEV 2021 – 2022

La visualización de la ET_0 , se obtiene según el intervalo de tiempo deseado (diario, mensual, trimestral, anual), para este estudio se estiman los valores diarios y el promedio mensual de la ET_0 para los años 2021 - 2022 hasta junio del 2023, donde finaliza el registro de datos para el presente estudio. Se encuentra que para la zona el valor promedio valor promedio anual de ET_0 para la zona es de 4.32 mm/día para los años 2021 y 2022, los valores más altos se registran en los meses de mayo y junio 9.51 y 8.55 mm/ día, coincidiendo con los meses de temperaturas más altas y mayor tiempo de radiación solar según los datos reportados por la ER para las mismas fechas. Por otra parte, los valores de ET_0 más bajos se encuentran entre diciembre y enero 0.83 y 1.3 mm/día coincidiendo con la época invernal y la disminución de las horas disponibles de sol por día. La ET_0 promedio se observa en la figura 22. Los datos calculados muestran concordancia con la ET_0 esperada para los climas áridos y semiáridos con una temperatura promedio de aprox. 20°C según lo reporta la guía 56 de la FAO ver tabla 9. De la misma manera Sammis y Abudu presentan valores calculados para la ET_0 en cultivos de nogal para la región de El Paso, con valores estimados máximo entre 8 y 9.5 mm/día y de 1167 a 1210mm de ET_0 acumulado durante el verano (Abudu et al., 2016; Sammis et al., 2004).

Tabla 9. Adaptado de FAO 56. Promedio de ET0 mm/día por zona agroclimática árida - semiárida

Regiones	Temperatura promedio/ día °C		
	Templada -10°C	Moderada 20°C	Caliente >30°C
Tropicales y subtropicales: áridos y semiáridos	2-4	4-6	6-8
Regiones templadas: áridos y semiáridos	1-3	4-7	6-9

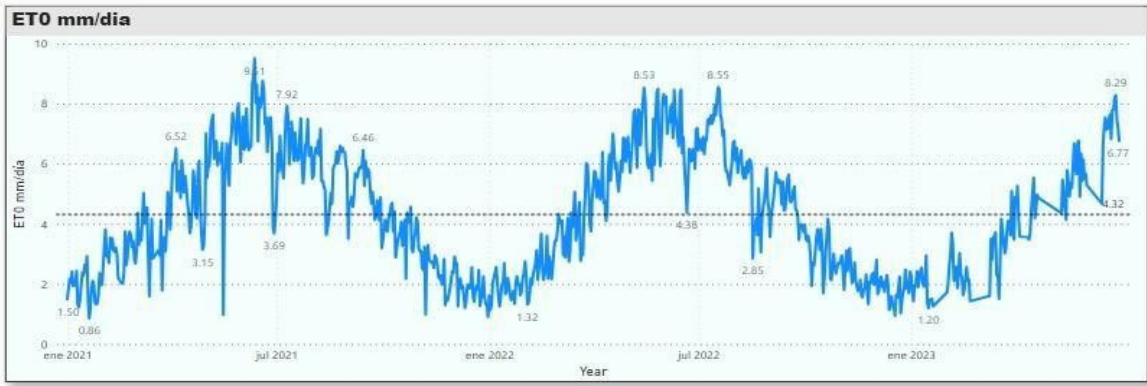


Figura 22. Evapotranspiración de referencia ET0, estimación diaria RR años 2021-junio 2023

La ET0 es fuertemente dependiente de las condiciones climáticas de la zona para el norte de México esta se relaciona con los cambios estacionales y el arrastre de los vientos hacia el pacífico lo que reduce considerablemente la humedad de la superficie y a su vez el arrastre de masas de aire de los desiertos de Norteamérica, reduciendo la saturación en el aire, lo cual explica valores más altos de ET0. ((Ruíz Álvarez et al., 2018)

Adicionalmente se observaron otras variables meteorológicas como la humedad relativa encontrando que para la primera mitad del año cuando la ET0 es menor y la humedad en la atmósfera registra valores mayores, la Humedad Relativa (HR) es una variable que se comporta de forma inversa a la temperatura, por lo que en la época invernal la HR aumenta y los valores de ET0 son más bajos, debido a que la atmósfera presenta mayor saturación (Chow et al., 1994). Para el comienzo de la primavera esta condición se invierte y la ET0 va incrementando de manera gradual hasta alcanzar sus valores más altos durante los meses de verano, dónde la temperatura también incrementa, a menor contenido de agua en el aire el proceso que toma mayor relevancia en este equilibrio es el de la evaporación de agua de la superficie radiante en este caso el suelo,

después de la segunda mitad del año el proceso se invierte nuevamente la atmósfera presenta un mayor contenido de humedad y la ET0 disminuye hasta alcanzar nuevamente los valores más bajos en la época invernal.

4.3. Humedad y Temperatura del Suelo

La red de CeTraTecIA cuenta con sensores de humedad del suelo y de un sistema de riego por micro-aspersión automatizado, los sensores se encuentran distribuidos en el cultivo un total de 3 multidepth con capacidad para dar mediciones diarias de temperatura y humedad en % a profundidades de 10cm, 20cm, 30cm, 45cm, 60c, 90cm (Granados-Olivas et al., 2021). Con las siguientes configuraciones

Tabla 10. Configuración de sensores Sensoterra para calibración en Rancho Reforma.

Sensores Rancho Reforma		
Nogales Noroeste	Nogales suroeste	Sensor Sureste Nogales
número de serie 24000096089	número de serie 24000095761	número de serie 24000095785
Humedad 52 %	Humedad 51 %	Humedad 2 %
Suelo franco arenosa 5 (6,8% org.)	Suelo franco arenosa 2 (7,2% org.)	Suelo franco arenosa 2 (7,2% org.)
Punto de ajuste bajo 18 %	Punto de ajuste bajo 22 %	Punto de ajuste bajo 22 %
Punto de ajuste alto 33 %	Punto de ajuste alto 36 %	Punto de ajuste alto 36 %
Estado operativo	Estado operativo	Estado operativo
Última actualización 23 de mar. de 2022, 5:16	Última actualización 23 de mar. de 2022, 4:36	Última actualización 23 de mar. de 2022, 4:22

Los datos fueron extraídos de la API de sensoterra y transformados en PBI para producir visualizaciones del comportamiento de la humedad durante los meses de noviembre de 2021 a marzo de 2022. Encontrando los siguientes comportamientos de la humedad en el suelo en profundidades de 10 a 45cm. Esta se considera como zona de interés en el análisis puesto que para cultivos de nogal la zona de absorción radicular se encuentra en estos rangos de profundidad. Este parámetro se monitoreo durante los meses de noviembre a marzo en donde se registra la humedad y el movimiento del agua en el suelo de la siguiente manera.

Para el sensor Noreste los mayores porcentajes de humedad inicialmente en el mes de noviembre, se encuentran a 50.3% a 45 cm de profundidad a una temperatura promedio de 11,23°C, en diciembre la humedad incrementa hasta 75% a 45cm de profundidad a 62% a 60cm, con poca retención en los primeros 30cm según se observa en la figura 23, en donde las variaciones en la temperatura corresponden a los cambios estacionales. Para el suelo franco arenoso, se programa la capacidad de campo (FC por sus siglas en ingles) en 36 % y el punto de marchitez (WP por sus siglas en ingles) en 22 %, se observa la humedad inicia en el mes de noviembre por encima del FC y luego disminuye hasta cero lo que indica una baja retención del agua en los primeros 10 cm, para las siguientes profundidades la humedad se mantiene por debajo del WP a 20 cm, acumulándose mayormente entre los 45 y 60cm. Después del segundo evento de lluvia el sensor muestra como la humedad se mantiene en el rango de FC, entre los meses de enero a marzo en donde se presenta una nueva precipitación antes de iniciar con el primer riego del cultivo.

SENSOR NORESTE

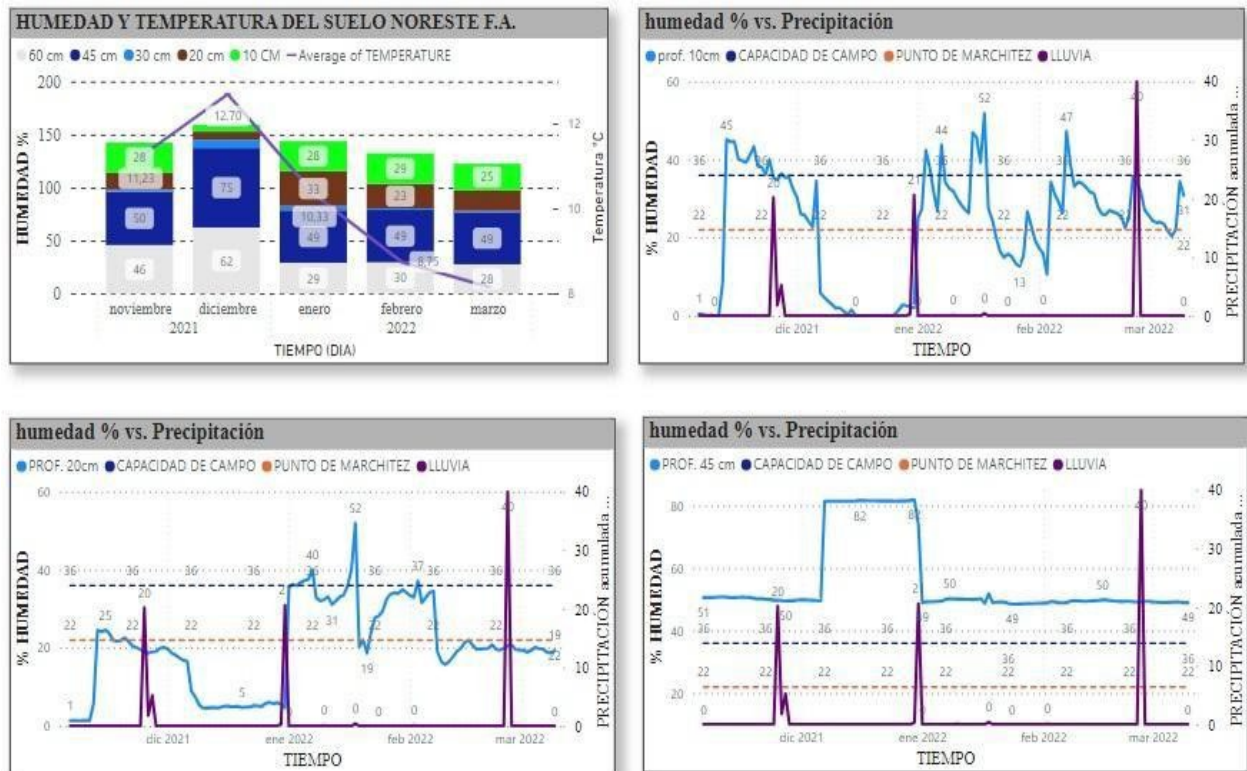


Figura 23. Variación de la humedad y la temperatura en el suelo, Sensor Noreste – franco Arenoso

SENSOR SURESTE

Para el sensor Sureste los mayores porcentajes de humedad inicialmente en el mes de noviembre, se encuentran a 20 cm y 60 cm de profundidad 77.9% y 80.24% respectivamente a una temperatura de 12°C aproximadamente, en los siguientes meses diciembre a febrero la humedad disminuye y se distribuye de manera uniforme en las diferentes profundidades con rangos entre el 35% y el 45% según se observa en la figura 24, el cambio en la temperatura mantiene el mismo patrón estacional. Para el suelo franco arenoso, se observa la humedad inicia en el mes de noviembre por debajo del WP entre 9 y 5.4% a 10 cm, para las siguientes profundidades la humedad se mantiene dentro del WP a 20 cm y por debajo del rango de WP a 30cm casi de forma constante hasta el mes de marzo.

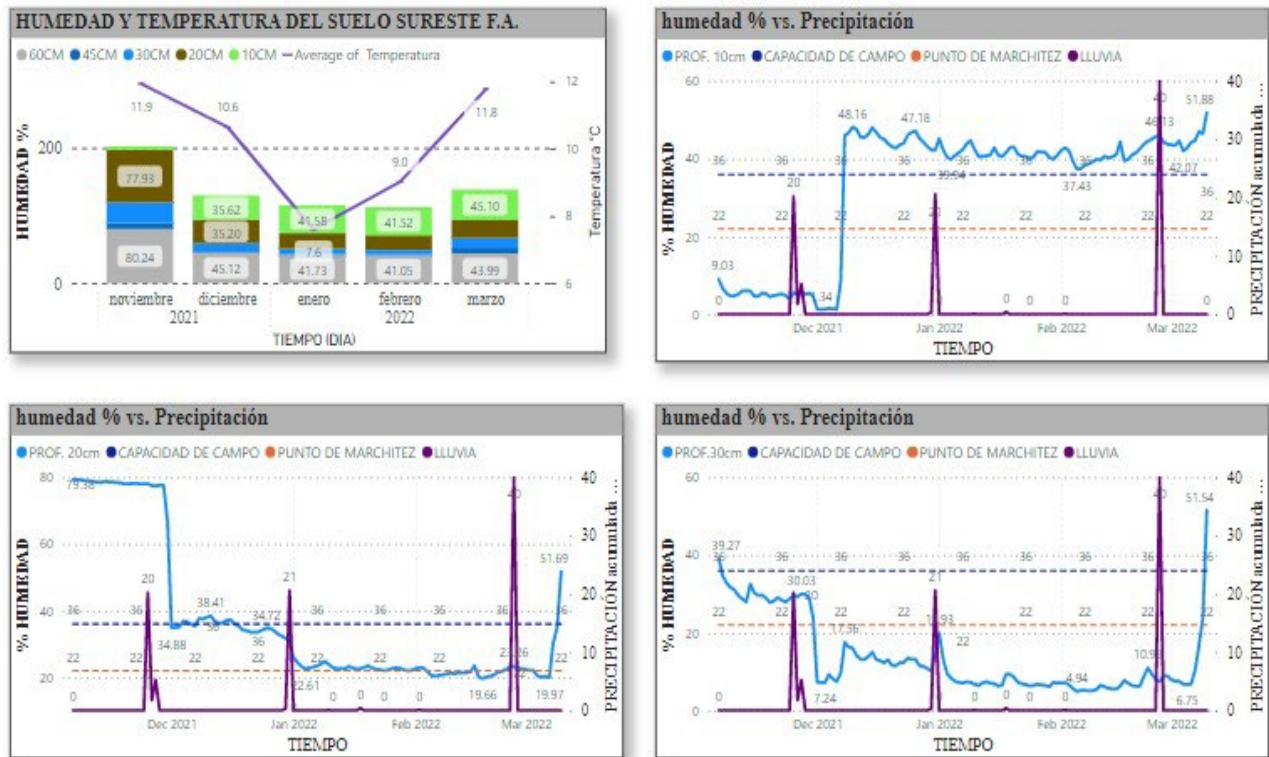


Figura 24. Variación de la humedad y la temperatura en el suelo, Sensor Sureste – franco Arenoso

SENSOR SUROESTE

Para el sensor Suroeste los mayores porcentajes de humedad inicialmente en el mes de noviembre, se encuentra a 30 cm de profundidad 77.9% a una temperatura de 12°C aproximadamente, figura 25, el cambio en la temperatura mantiene el mismo patrón estacional. Para el suelo franco arcillo-arenoso se establece el FC en 43 % y el WP en 31%, en diciembre la humedad se mantiene en rango óptimo para FC durante todo el mes, a 30cm, para las siguientes profundidades la humedad se mantiene dentro del WP a 20 cm y por debajo del WP a 30cm hasta el mes de marzo. La humedad muestra un rango óptimo para FC a entre 30 y 60cm de profundidad de enero a marzo.

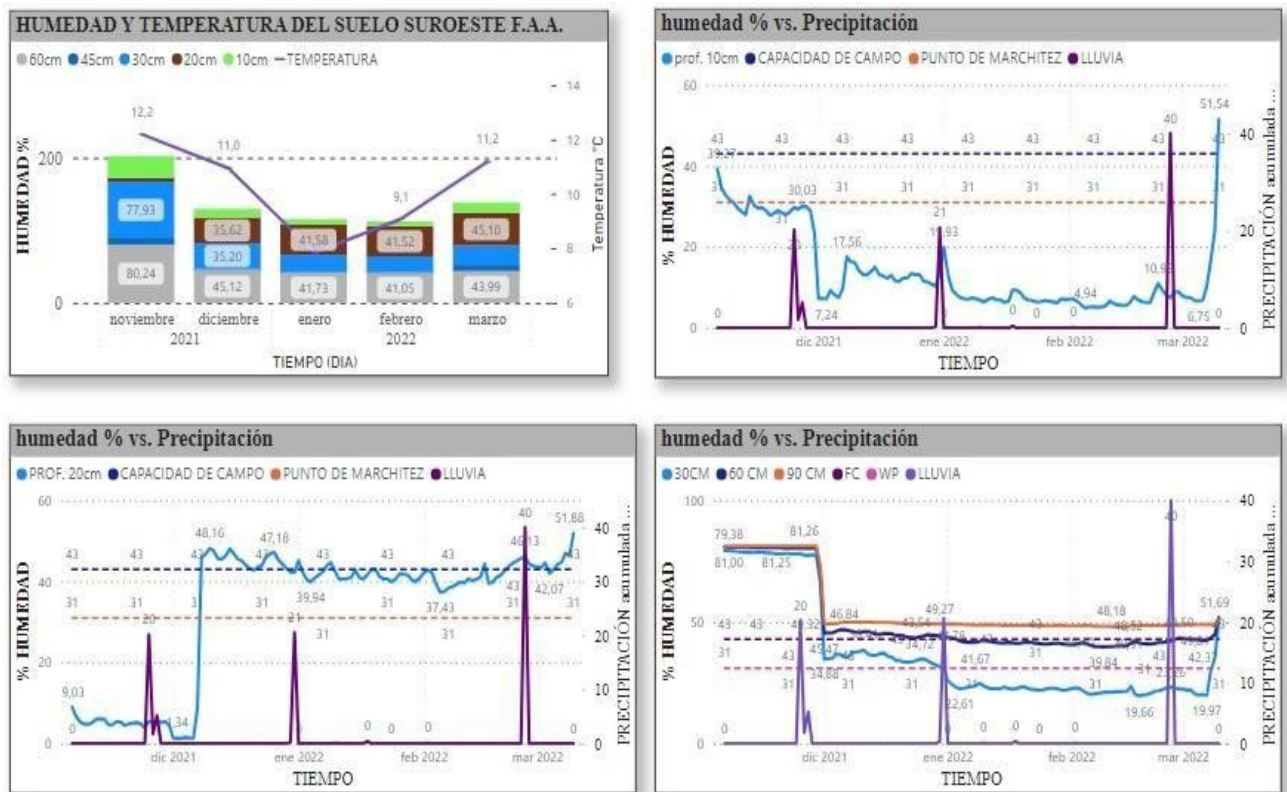


Figura 25. Variación de la humedad y la temperatura en el suelo, Sensor Sureste – franco Arcillo-arenoso

4.3.1. Determinación de ETC

Para la estimación de la ETC, se emplean los valores de Kc que aparecen en la tabla 8. Se obtiene la curva de Kc y se calcula la ETC programando la Ec. 7 en PowerBi. A partir de esta tabla de datos se obtienen las visualizaciones de ETC en diferentes escalas de tiempo, para efectos de este

estudio, se emplearon sólo los valores promedio mensuales, en la fig. 26 se puede observar la ETc promedio en valores de mm/día, mostrando valores máximos en los meses de verano alcanzando 7 a 9 mm/día en contraste con su disminución en los meses invernales donde sus valores se acercan a 0 debido al período de dormancia del cultivo, una comparación con la ET₀ es realizada agrupando los datos en promedios mensuales tomando los registros de los datos de los años 2021 - 2023 se muestra en las figuras 27 y 28. Aunque las tendencias de aumento y disminución de los valores son similares, se puede observar que para los meses de verano, la ETc, es mayor que la ET₀, lo que implica que hay una mayor demanda hídrica del cultivo en esta época debido al incremento de las temperaturas y la etapa fenológica en la que se encuentra el cultivo que corresponde al crecimiento y llenado de la almendra, estos valores se muestran consistentes con los reportados por Rodríguez (2010) y Sammis (2004).(Rodríguez et al., 2011; Sammis et al., 2004).

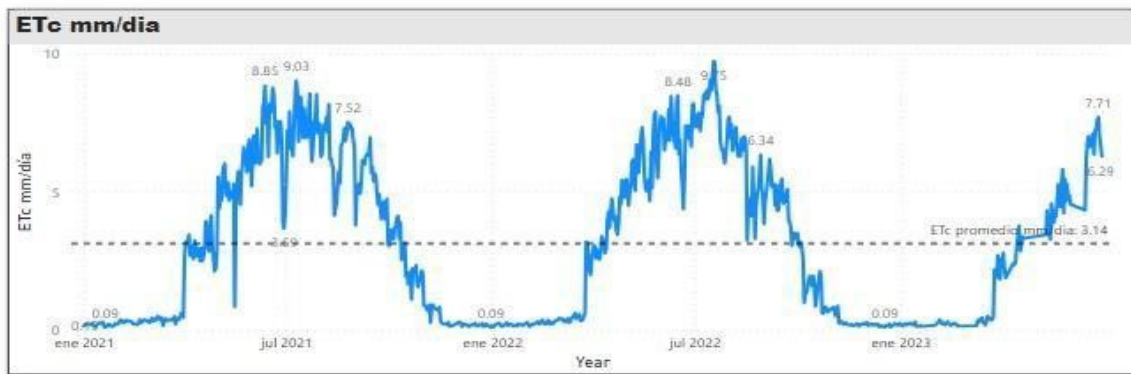


Figura 26. Evapotranspiración de referencia ET₀, estimación diaria año 2022



Figura 27. Comparación entre evapotranspiración de referencia ET₀ y Evapotranspiración de cultivo ETc estimación diaria año 2021

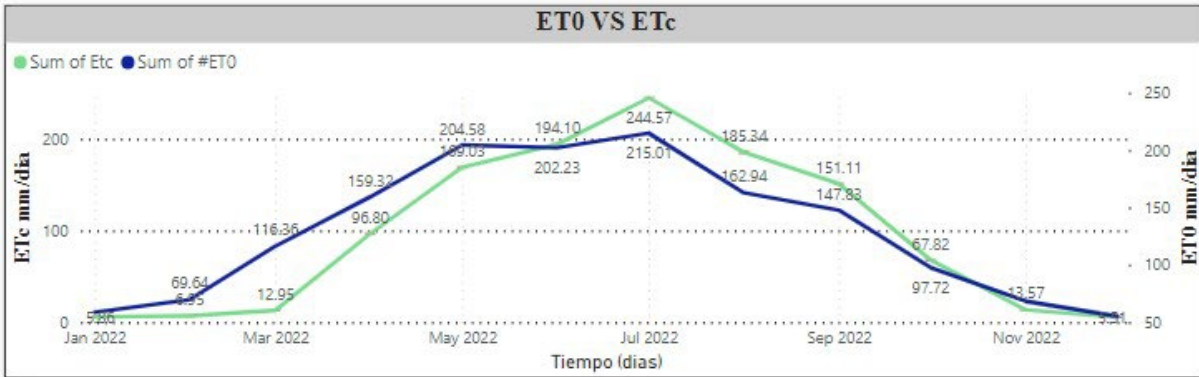


Figura 28. Comparación entre evapotranspiración de referencia ET₀ y Evapotranspiración de cultivo ET_c estimación diaria año 2022

En comparación se obtienen valores de ET_c por debajo de los estimados para ET₀, mientras ET₀ representa un indicador de la demanda climática dependiendo de la temperatura y los cambios estacionales, Para ET_c el valor de K_c varía principalmente en función de las características particulares del cultivo, presentando valores más bajos en el periodo de dormancia del nogal, donde la demanda hídrica es baja, esta condición, variando solo en una pequeña proporción en función del clima (Tarango, 2015). Se espera que, en cultivos jóvenes de nogal de dosel cerrado, el coeficiente K_c y la radiación n solar interceptada sean proporcionales, el proceso principal será el de evaporación de la superficie radiante, debido a que el área foliar no se ha desarrollado totalmente y la transpiración de la planta sucede a una tasa menor, en este caso el suelo (Wang et al., 2007).

4.3.2. Balance Hídrico y calendarios de Eficiencia de Riego

Una vez determinada la ET_c, se calcula la ETR en por día y por fecha según el calendario de riego y la tabla de desarrollo fenológico del Nogal, se consideran factores como percolación y precipitación efectiva, aunque para la región los valores de acumulación en el suelo son casi 0, con unos pocos eventos de precipitación durante el año, figura 29. Los valores calculados se expresan como déficit de riego y a partir de estos se determina el valor de la lámina de riego por cm y por hectárea.

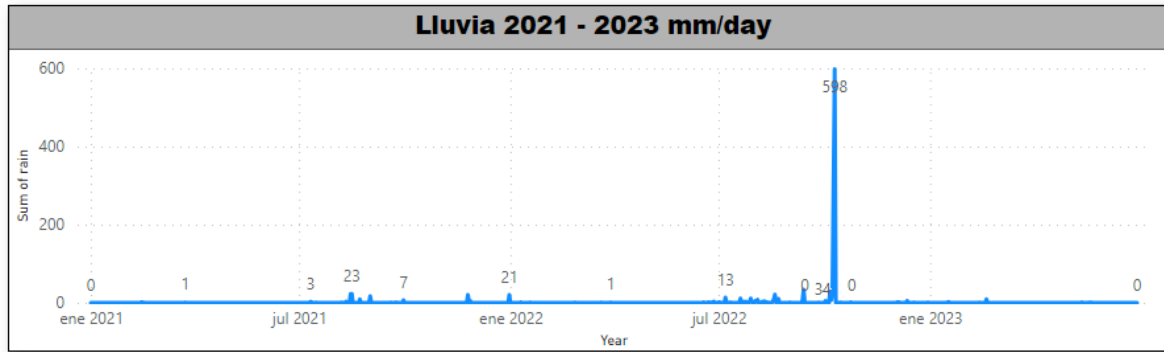


Figura 29. Precipitación registrada entre enero 2021 y junio 2023 en la estación climatológica RR

Ajustando la ec.1. para uso consuntivo del agua consideramos el siguiente diagrama (Fig.30) para definir los algoritmos de la lámina de riego, una vez definida la ruta se programó la hoja de cálculo correspondiente al balance hídrico para cultivos de Nogal en clima semiárido, con suelo mayormente de tipo arcilloso y precipitaciones bajas según la guía de riego y drenaje, el modelo de balance hidrológico corresponderá con las entradas (riego y lluvia) y salidas (escorrentía, percolación y evapotranspiración) del sistema considerando además la dinámica del suelo en factores como la humedad, temperatura la capacidad de almacenamiento, según su composición.



Figura 30. Esquema de entradas y salidas en el modelo de balance hídrico.

Para el presente estudio el Rancho el Regalo tiene una superficie de tierra seca y llana para riego, debido a los escasos fenómenos de precipitación, por lo tanto, se asume como 0 el agua disponible para el ascenso capilar, así como la escorrentía por lo plano de suelo, entonces la ecuación simplificada se presenta de la siguiente manera. (Lozoya et al., 2016) y se representan las entradas y salidas teniendo en cuenta el comportamiento de las variables en el tiempo como lo muestra la figura 31.

$$\theta H = ir(t) - ETc(t) - PER(t)$$

ec. 9

Se definen las variables de la siguiente manera y se programó la hoja de cálculo para determinar la lámina de riego en los periodos de marzo a octubre, según la etapa activa del nogal.

θH = variaciones de humedad en el suelo

Ir: irrigación

Pef= precipitación efectiva

PT= precipitación total

ESC = Escorrentía

PER= percolación

D= Déficit

Ret= retención en el suelo

L= Lámina Máxima

ETR= evapotranspiración real

ET0= evapotranspiración de referencia

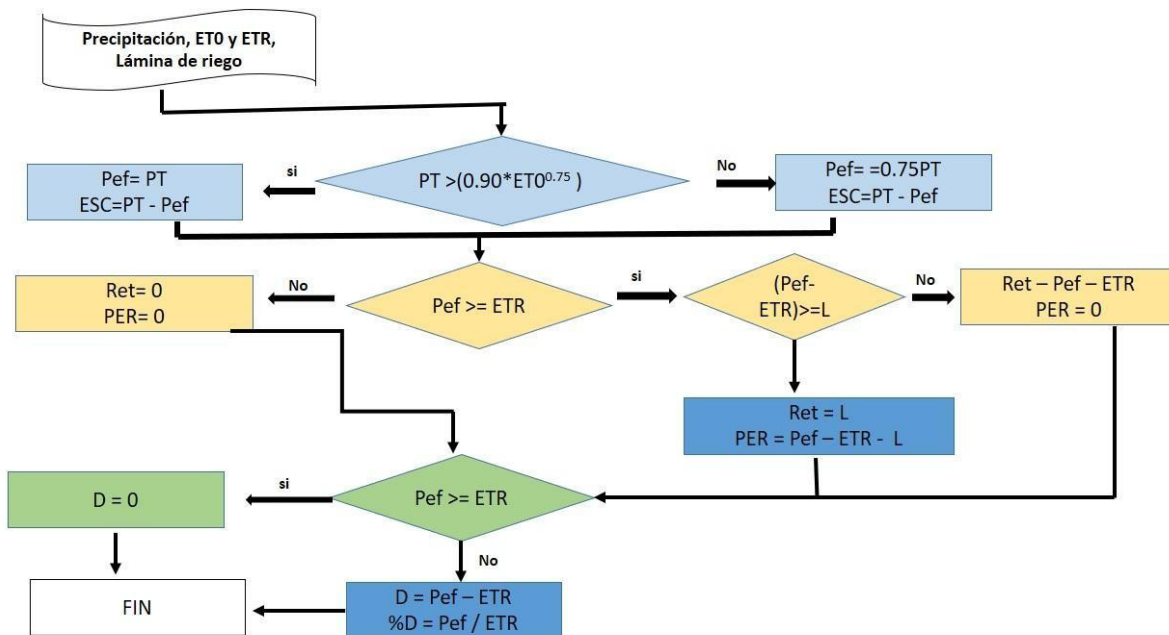


Figura 31. Diagrama de flujo determinación de los parámetros de cálculo de la lámina de riego para cultivos de Nogal. (adaptado de la guía de riego y drenaje FAO 56)

El análisis de tipo de suelo realizado en un estudio anterior permite establecer valores para la densidad del suelo, el punto de marchitez, la capacidad de campo y del tipo cultivo se obtiene la profundidad de las raíces como se observa en la tabla 11.

Tabla 11. Lámina máxima de retención textura del suelo Arcilloso

Tipo de suelo	Arcillo- Arenoso	Arcilloso
Capacidad de campo	48	45
Punto de marchitez	22	32
Densidad	1,55 g/l	1, 55g/l
Profundidad de raíces	450	450
Lámina máxima de retención	181,35mm	90,67mm

Con los valores de la ET0 obtenidos de la estación RR en mm/día, se calcula el promedio de la ET0 acumulada por mes de los periodos 2021 – junio 2023. Se programan las celdas en la hoja de cálculo con los valores establecidos para los siguientes que se listan en seguida, se toman como referencia los valores estandarizados y se procede al cálculo del requerimiento de riego estimando los volúmenes requeridos de acuerdo con el promedio de los datos recolectados por la estación RR y por los sensores conectados a la tecnología Lora WAN instalada en el CeTraTecIA. En las tablas

Periodo: 2021 – a junio 2023

Mes: enero a diciembre

PT mm/mes: promedio precipitación acumulada mm/mes

$ETc \text{ mm/mes} = ET0 * Kc$

$Pef \text{ mm/mes} = SI(PT > (0,9 * ET0)^{0,75}; PT^{0,75}; ET0)$

$\text{déficit mm mes} = SI(Pef \geq ETc; 0; Pef - ETc)$

Lámina bruta mm = DEFICIT

Lámina neta mm = Lámina bruta * eficiencia de riego

Lámina Neta m³/Ha = Lamina neta * 10

Tabla 12. Balance hídrico para el cultivo de Nogal, Rancho el Regalo

MES	ET0 MM/ MES	PT MM/M ES	ETC MM/ MES	PEF MM/ MES	DEFIC IT MM MES	LAMINA BRUTA MM	LAMINA NETA MM	LAMINA NETA M3/HA
Marzo	93,83	0,70	11,26	0,70	-10,56	10,56	12,42	124,20
Abril	126,78	0,00	76,07	-0,39	-76,45	76,45	89,94	899,45
Mayo	172,77	0,88	141,67	0,88	-140,79	140,79	165,64	1656,38
Junio	179,36	2,81	172,18	2,81	-169,37	169,37	199,26	1992,59
Julio	205,69	1,54	234,49	1,54	-232,95	232,95	274,06	2740,56
Agosto	167,36	43,92	190,79	32,94	-157,85	157,85	185,71	1857,05
Septiembre	144,82	22,37	147,72	22,37	-125,35	125,35	147,47	1474,72
TOTAL	1090,6	71,8	974,2	60,9	-913,3	913,3	1074,5	10744,9

Tabla 13. Requerimiento de riego para el cultivo de Nogal, Rancho el Regalo, Asc. Chi.

Calendario de Riego ajustado para cultivo de Nogal									
MES	FECHA	Días	ET0	ETR			demanda hídrica		
			mm/día	mm/día	mm/periodo	m ³ /día/Ha	m ³ /periodo/Ha	caudal m ³ /h	eficiencia
Marzo	25 mar	20	3,10	0,36	7,26	3,63	72,65	0,15	85,47
Abril 1	15 abr	15	4,30	2,54	38,03	25,36	380,33	1,06	447,45
Abril 2	30 abr	15	4,30	2,54	38,03	25,36	380,33	1,06	447,45
Mayo 1	15 may	15	5,65	4,57	68,55	45,70	685,51	1,90	806,48
Mayo 2	30 may	15	5,65	4,57	68,55	45,70	685,51	1,90	806,48
Junio 1	15 Jun	15	6,05	5,74	86,09	57,39	860,92	2,39	1012,85

Junio 2	30 Jun	15	6,05	5,74	86,09	57,39	860,92	2,39	1012,85
Julio 1	15 Jul	15	6,71	7,56	113,46	75,64	1134,64	3,15	1334,87
Julio 2	30 Jul	15	6,71	7,56	113,46	75,64	1134,64	3,15	1334,87
Agosto 1	15 Ago	15	5,47	6,15	92,32	61,55	923,18	2,56	1086,09
Agosto 2	30 Ago	15	5,47	6,15	92,32	61,55	923,18	2,56	1086,09
Septiembre 1	12 Sep	15	4,90	4,92	73,86	49,24	738,60	2,05	868,94
Total		185	64,35	58,41	878,04	584,15	8780,40	24,34	10329,88

La demanda hídrica del cultivo estimada en la tabla 15. Es de 1074,5 mm/periodo, valores similares se reportan por Abudu para cultivos de nogal en la región de El Paso, Tx en el 2014. (Abudu et al., 2016). El balance hídrico estimado por el presente estudio para determinar los calendarios de riego para el cultivo de Nogal del CeTraTecIA en Ascensión, Chih., fue obtenido a partir de los datos capturados en tiempo real por la Estación Reforma, permitieron calcular un total de volumen de agua igual a 10329,8 m³/periodo/Ha, que hubiesen sido requeridos para regar el cultivo durante el periodo 2021 y 2022. Actualmente el cultivo se riega con un volumen de 16 248 m³/periodo/Ha, lo que representa un uso de 5919 m³/periodo/Ha por encima de los requeridos realmente por el cultivo, por lo cual se observaría un ahorro de aproximadamente un 36, 43% de agua de riego por hectárea y por ciclo anual.

4.4. Estandarización de datos y análisis estadístico

En la tabla 14 se muestran para las variables correspondientes al porcentaje de la humedad relativa promedio, sumatoria mensual de la lluvia en mm, ET0 y ETC en mm/día y el viento promedio calculado a 2m en m/s. Con los valores estandarizados se determina la correlación entre las variables calculando en hojas de cálculo el coeficiente de correlación r existente entre la ET0 y la ETc, la humedad y el viento encontrando los valores que se muestran en la tabla 15.

Como resultado del coeficiente r se encuentra que entre la humedad y la ET0, la relación es moderada y negativa, en donde se espera que al tener un aumento en la ET0, la humedad relativa del aire tienda a disminuir y viceversa. Se entiende que para valores altos de humedad relativa en el aire como los que se presentan durante los meses invernales noviembre – febrero la ET0 sea más baja por la disminución en la temperatura y menor poder evapotranspirante de la atmósfera.

Tabla 14. Valores de humedad, ETC, ET0, lluvia y vientos, ERR 2021 - 2023

Mes	humedad relativa promedio %	lluvia mm	ETR mm/mes	ET0 mm/mes	viento promedio m/s
Enero	51,91	2,40	15,48	51,60	6,59
Febrero	37,89	4,82	19,98	66,59	8,03
Marzo	29,54	1,09	54,52	96,06	10,51
Abril	20,63	0,00	244,22	129,00	11,28
Mayo	20,12	1,27	439,29	175,00	10,36
Junio	29,65	3,20	531,17	181,58	8,59
Julio	48,97	1,93	474,06	207,92	6,39
Agosto	59,86	44,31	384,44	169,59	6,19
Septiembre	53,54	22,76	294,82	147,05	4,51
Octubre	52,81	326,80	128,97	104,12	5,46
Noviembre	46,32	9,07	24,27	69,89	3,68
Diciembre	56,2	11,52	11,36	56,82	4,88
suma media	507,44 42,29	429,16 35,76	2622,58 218,55	1455,21 121,27	86,48 7,21
estándar dev	14,13	92,54	200,46	54,49	2,53

Tabla 15. Prueba de correlación r para ET0 , ETC, Humedad, viento, lluvia promedio mensual 2021 – 2023

Mes	humedad relativa promedio %	lluvia mm/mes	ETR mm/mes	ET0 mm/mes	viento prom. m/s
Enero	48,92	2,01	14,39	49,37	3,74
Febrero	34,90	4,44	18,89	64,36	5,18
Marzo	26,55	0,70	53,43	93,83	7,66
Abril	17,64	-0,39	243,13	126,78	8,43

Mayo	17,13	0,88	438,20	172,77	7,52
Junio	26,66	2,81	530,08	179,36	5,75
Julio	45,98	1,54	472,97	205,69	3,54
Agosto	56,87	43,92	383,35	167,36	3,34
Septiembre	50,55	22,37	293,73	144,82	1,66
Octubre	49,82	326,41	127,88	101,89	2,61
Noviembre	43,33	8,68	23,18	67,66	0,83
Diciembre	53,21	11,13	10,27	54,59	2,03
Coeficiente de correlación ET ₀ y ET _c 0,97					
Coeficiente de correlación ET ₀ y Lluvia 0,32					

De esta manera se mantiene la tasa de saturación como se muestra en la figura 32. Se espera que el poder evapotranspirante de las plantas incremente para el inicio de primavera cuando el nogal finaliza la dormancia e inicia con etapa la de brotación. hasta alcanzar un máximo valor durante el verano en donde la humedad relativa del aire desciende alcanzando valores que van entre el 20 y 30% en promedio.

En cuanto a la correlación entre la ET₀ y ET_c esta tiene un valor de 0.91 lo que demuestra una relación fuerte y directa, indicando que las dos incrementan o disminuyen en función del tiempo climático, como se indica en la Fig. 30. Este resultado facilita la comprensión de los requerimientos del nogal y permite planificar el riego y gestionar el recurso hídrico. Sin embargo, es importante mencionar que la aunque la relación entre las variables es fuerte no implica causalidad, por lo que es necesario evaluar otros parámetros climáticos y edafológicos para mayor precisión.

Además, se realizó una comparación entre las horas disponibles de sol y su relación con los valores estimados para ET₀ y ET_c, encontrando que los valores incrementan cuando el número de horas de sol es mayor, coincidiendo con la estación de verano, mientras que son más bajos para los periodos invernales lo que indica que una mayor exposición a la radiación solar aumenta el poder evapotranspirante de la atmósfera.



Figura 32. Variación de la ET0, ETC y humedad relativa en la estación RR 2021- junio 2023

4.5. Construcción de la interfaz de usuario para la plataforma de Riego en tiempo real para cultivos de Nogal en el programa FIGMA

En el proceso de construcción de la interfaz de usuario de aplicación computacional CeTraTecIA Data App, se tienen herramientas que nos permiten identificar problemas de los agricultores al momento de definir el riego de los cultivos, como solución se plantea el diseño de una aplicación de riegos, iniciando desde el desarrollo de la interfaz de usuario respondiendo a las categorías y subcategorías para la extracción de datos en la tabla 16 se presenta un resumen de las categorías y subcategorías empleadas para el diseño de interfaces de usuario. (Gutiérrez et al., 2019)

Tabla 16. Categorías y Subcategorías (adaptado Gutiérrez et al, 2019)

Prototipo de Aplicación web – interfaz de usuario	
Usuario	Agricultor, Administrador de granja, Académico
Tipo de Herramienta	Software para la agricultura
Plataforma	Diseñado para funcionar el sistemas de escritorio o móvil
Visualización y origen de los datos	Estaciones meteorológicas, sensores, datos agroclimáticos, calendarios de riego
Tipo de diseño	Iterativo, basados en el ciclo creación, desarrollo y evaluación de prototipos (thinker design)

Se empleó el programa FIGMA previamente se definieron los requerimientos de la interfaz de usuario, fuentes, paleta de colores, logotipo, iconos para su funcionamiento en la producción de calendarios de riego en tiempo real para cultivos de Nogal. Se espera que esta interfaz le permita al usuario acceder a una plataforma de recolección de datos agroclimáticos que le permitan establecer su ubicación, seleccionar el tipo de cultivo, la frecuencia y el tipo de riego y visualizar clima y calendario de riego. Generar la interfaz de usuario con sus características permite seleccionar predecir la forma en la que el agricultor interactúa con la aplicación web, así como la arquitectura de datos necesaria para pasar de la fase de prueba de concepto a la de prototipo en funcionamiento.

4.5.1. Paleta de Color, Logotipo e iconos

El diseño de la interfaz inicia con la definición de la paleta de colores que se prefiere para se toman como referencia imágenes de nogales, se cargan al sitio web ColorAdobe.com y se generaron los códigos en RGB que fueron empleados en las diferentes interfaces, ver figura 33. Estos colores son posteriormente empleados en el diseño del logo y se sometieron a pruebas de contraste para determinar si la selección resultaba favorable para la lectura y accesibilidad del usuario.



Figura 33. Paleta de color Interfaces IrrigationData App

Se diseñó una propuesta de logotipo para el CeTraTecIA con la paleta de color seleccionada, empleando elementos diferenciadores de la propuesta del centro sobre el uso de la IA, la agricultura y el cuidado del agua. Ver figura 34.



Figura 34. Logo CeTraTecIA

Se emplea la plataforma Figma para diseñar un total de 35 paneles para la interfaz, que prototipan las principales funciones de la aplicación iniciando con la pantalla de carga en donde el usuario se familiariza con el logo del CeTraTecIA y accede con su usuario y una contraseña ver Fig. 35.



Figura 35. Pantalla de carga de la App

Al pulsar enviar el agricultor accederá a la segunda interfaz, en donde se encuentra el Menú, el usuario selecciona de forma intuitiva el icono de su preferencia según la necesidad, encuentra 5 opciones, Ubicación, Clima, Riego, Sensores de Humedad, Visualizaciones y Contáctanos. Ver figura 36.



Figura 36. Interfaz Menú (Fuente: FIGMA)

A continuación, se presenta la interfaz ubicación que cuenta con cajas de texto para que el usuario ingrese los valores de Latitud y Longitud, posición N - S; E-O. Además, se diseña la opción para localización por GPS, en una nueva caja se ubica la estación climatológica, el tipo de riego y la textura del suelo. De estas opciones aparecen opciones desplegables que deben estar previamente cargadas en el código de la interfaz.

En la figura 37, se observan 4 transiciones, programadas para completar los datos en la interfaz, para la programación de calendarios de riegos es necesario contar con los datos climatológicos en tiempo real, se puede acceder a la base de datos de la NASA, o como en el caso del presente estudio la estación climatológica del CECATEV-UACJ. Los datos referentes a localización se emplean para precisar la posición de la estación más cercana. El tipo de riego generara, información referente a la eficiencia del riego y el caudal requerido.

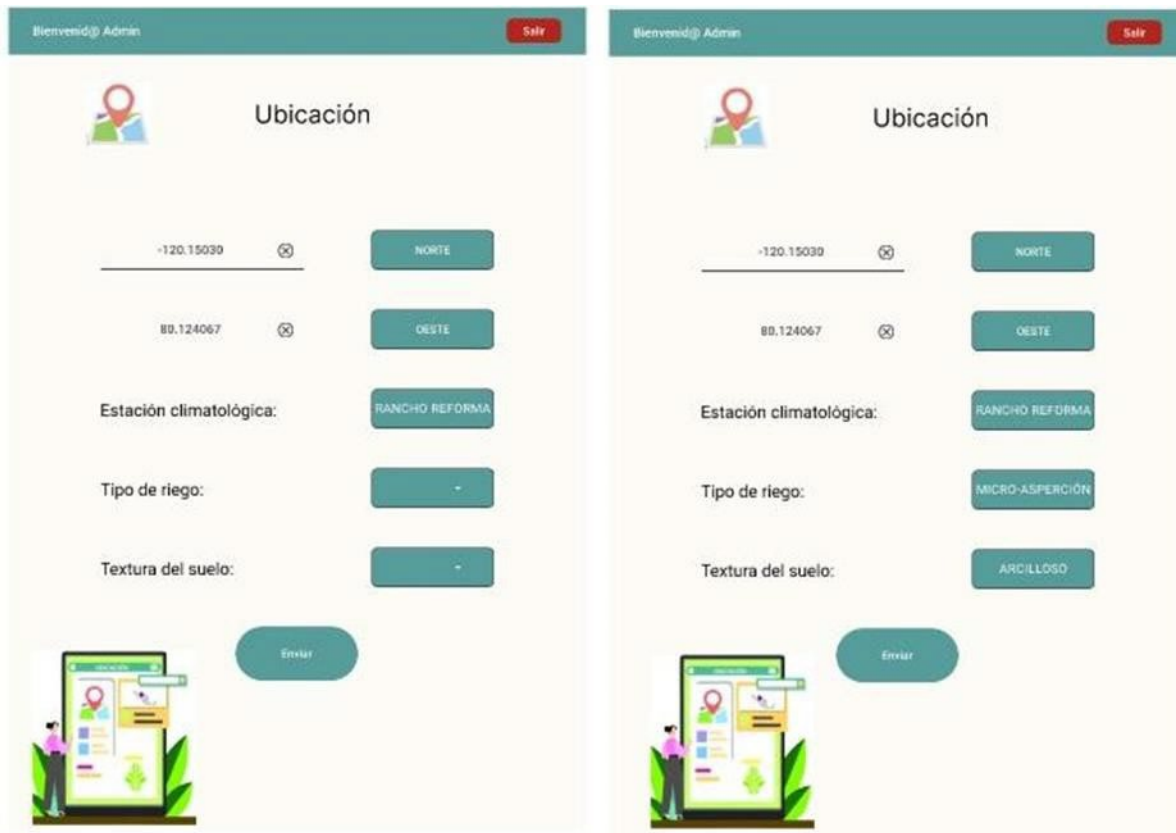


Figura 37. Interfaz Ubicación (Fuente: FIGMA)

La interfaz diseñada para los parámetros climatológicos cuenta con un calendario, se espera contar con datos sobre temperaturas máximas, mínimas y medias, así como con lluvias y vientos. Se emplea un icono sencillo de sol-nube, que es fácilmente identificable por el usuario, de esta forma puede seleccionar de manera intuitiva la fecha y el o los parámetros que desea visualizar. Fig. 38.



Figura 38. Interfaz Clima (Fuente: FIGMA)

La siguiente interfaz corresponde a visualizaciones, está dirigida a un usuario con un nivel de aproximación de tipo técnico, tecnológico y/o profesional, que busque conocer las tendencias y monitorear el comportamiento del clima en un periodo de tiempo determinado, en el panel se observan variables climatológicas, temperatura, lluvia, ET0 que se pueden seleccionar para producir gráficos y tablas, con cuadros de diálogo que presenten una breve descripción sobre las visualizaciones. Fig. 39.

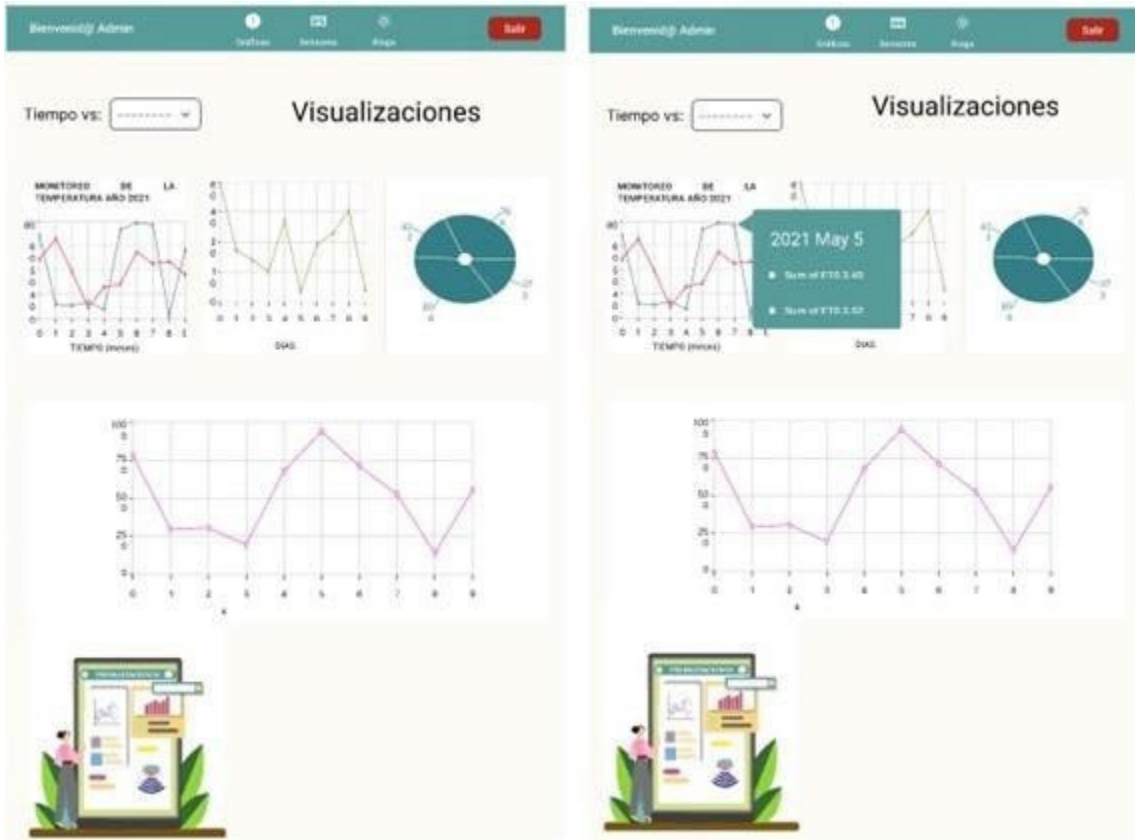


Figura 39. Interfaz Visualizaciones (Fuente: FIGMA)

Posteriormente encontramos la interfaz para los sensores de humedad, donde el agricultor puede monitorear la humedad del suelo del cultivo y terminar el rango ideal de riego requerido manteniendo los porcentajes entre la capacidad de campo y el punto de marchitez, esta interfaz debe generar una alerta indique cuándo iniciar y/o detener el riego. Generando reportes de cada sensor de manera individual. La fuente de datos para esta interfaz será alimentada por la información capturada por los sensores instalados en el cultivo, el tipo de datos esperado es de tipo estructurado. Fig. 40.

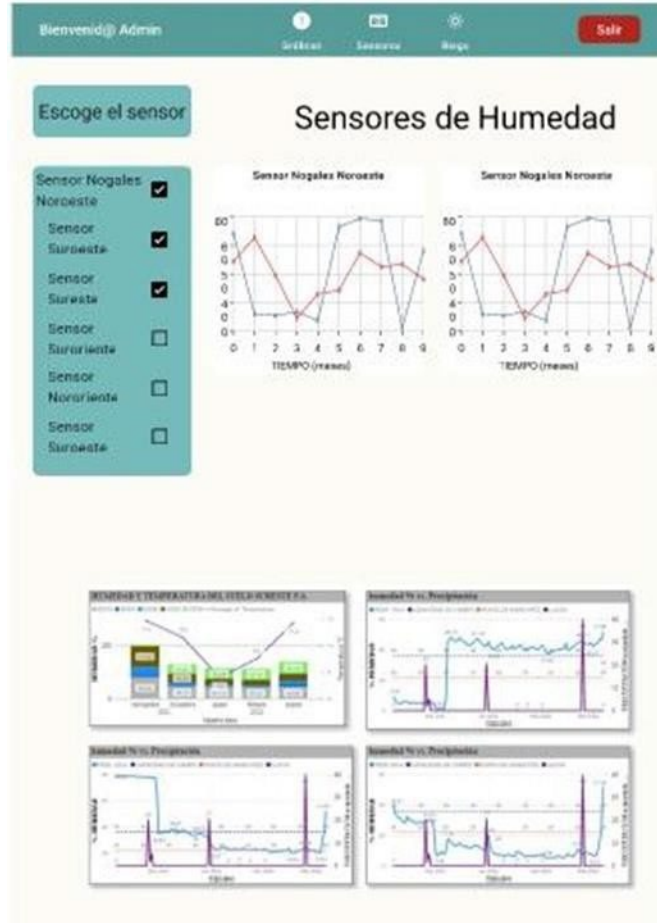


Figura 40. Interfaz Sensores de Humedad (fuente: FIGMA)

Por último, se diseñó la interfaz para riego en la que el agricultor podrá visualizar el calendario de riego generado por la app, basado en la etapa de desarrollo fenológico del cultivo, el resultado de la textura del suelo, la ET_0 , la K_c del cultivo, la humedad del suelo y la precipitación, Estos datos recolectados de diferentes fuentes y transformados para satisfacer la ecuación de balance hídrico. Permitirán la generación de esquemas de riego basados en datos recolectados en tiempo real. Dentro de la interfaz se identifican cajas para las fechas de riego, el tiempo de riego, el requerimiento en m^3/Ha , el caudal, y la humedad del suelo. Fig 41.



Figura 41. Interfaz de riego (Fuente: FIGMA)

Cada uno de los paneles de la UX se diseñó en la plataforma FIGMA, con el uso de ColorAdobe.com, CorelDraw 2020. Con las líneas de código que aparecen a continuación, el prototipo se encuentra actualmente en la etapa de prueba de concepto y puede ser visualizado en <https://www.figma.com/file/sHzGgbF1unvbAgUHIx2eka/IrrigationData-App?type=design&node-id=0%3A1&mode=dev&t=0HiDmQf9x4ihCojX-1>

Capítulo 5. Conclusiones

Los datos climatológicos y edafológicos obtenidos desde la ER y la red de sensores del CeTraTecIA; permitieron desarrollar algoritmos para estimar la ET₀, con la ecuación para datos climatológicos mínimos de Hargreaves y Samani, calculando para Ascensión Chih., una temperatura promedio igual a 17.83°C, una máxima de 41°C y una mínima de - 3.83°C, estos valores son ponderados a partir de los datos registrados por la estación meteorológica Rancho Reforma. El valor promedio mensual de ET₀ durante los periodos 2021 y 2022 es igual 4.32 mm/día, Este valor va variando durante las diferentes estaciones alcanzando su máximo valor 9.51 mm/día en julio del 2022 durante los meses de verano dónde la temperatura media aumenta, del mismo modo la ET₀ mínima se calculó para los meses de diciembre y enero con registros de 0.83mm y 1,3 respectivamente, coincidiendo con la época invernal y la disminución de las horas disponibles de sol por día. Los datos calculados muestran concordancia con la ET₀ esperada para los climas áridos y semiáridos con una temperatura promedio de aprox. 20°C según lo reporta la guía 56 de la FAO. (FAO - UN, 2006)

La Etc depende de las etapas fenológicas del cultivo, la demanda hídrica es menor durante la etapa inicial, donde los valores de K_c son más pequeños y aumenta incluso por encima de los valores de la ET₀, cuando el cultivo se inicia las fases de crecimiento y llenado de la almendra. La evapotranspiración estimada en este cultivo depende en gran medida del poder evaporante de la atmósfera ET₀. Al tratarse de un cultivo de menos de 10 años la cobertura de su dosel aun no alcanza un 10% de la cobertura del suelo siendo proporcional el coeficiente K_c a la radiación solar interceptada por el cultivo.

Los sensores de humedad responden a los parámetros de calibración según el análisis de textura de suelos encontrando que el suelo retiene bien la humedad y se mantiene dentro de los valores de WP para francos arenoso y arcillo-arenosos a profundidades de 30cm a 60cm. Sin embargo, es importante observar su comportamiento durante la época de riego, para determinar ajustes que permitan indicar el umbral de riego para satisfacer la capacidad de campo y ajustar este valor en la interfaz de usuario.

La ETc promedio alcanza entre 7 a 9 mm/día durante el verano y disminuye a cero durante el invierno, en comparación con la ET0 la demanda supera a la ET0 en los meses de verano por lo que el cultivo consume mayor cantidad de agua debido a la etapa fenológica en la que se encuentra que corresponde al crecimiento y llenado de la almendra, datos similares reportan Rodríguez (2010) y Sammis (2004)

La estimación de la demanda hídrica 1074,5 mm/periodo, permite ajustar los calendarios de riego empleando los datos colectados para calcular la ET0 con la ecuación para datos climatológicos mínimos de Hargreaves y Samani, y la ETc empleando el método descrito por la FAO. Datos similares se reportan por Abudu para cultivos de nogal en la región de El Paso, Tx en el 2014, adicional se comparan los valores de la lámina neta obtenida 10329 m³/periodo/Ha y la lámina neta actual 16 248 m³/periodo/Ha, encontrando que hay un ajuste y una optimización en el riego de casi 5900 m³/periodo/ Ha, logrando una reducción en el agua consuntiva del 36, 43% por hectárea y por ciclo anual.

Para el diseño de interfaz de usuario de aplicación computacional CeTraTecIA Data App, se tienen consideran las categorías y subcategorías para la extracción de datos descritas por Gutiérrez en 2019, apuntando a un software para la agricultura en la que el usuario puede ser un agricultor, administrador de granja o investigador académico, esta interfaz debe responder a funcionamiento en dispositivos de escritorio o móviles, en las que el origen de los datos estará enlazado estaciones meteorológicas, sensores y casillas programadas previamente, respondiendo a parámetros fijos, como el tipo de suelo, tipo de cultivo, Kc, FC, WP necesarios para visualizar calendarios de riego. (Gutiérrez et al., 2019)

Se diseñó la interfaz de usuario UX CeTraTecIA Data App en el programa FIGMA de Google, con ayuda del Centro de Inteligencia Artificial quienes aportaron formación al investigador, en programación, manejo, análisis y visualización de bases de datos, actualmente la UX se encuentra en fase de prueba de concepto y puede ser visualizada en el siguiente link <https://www.figma.com/proto/sHzGgbF1unvbAgUHIx2eka/IrrigationData-App?type=design&node-id=517-30744&t=H3q74KFSIqDs5nih-1&scaling=min-zoom&page-id=0%3A1&starting-point-node-id=517%3A30744&show-prot-sidebar=1&mode=design>

Se espera en un estudio posterior para poder dar paso al diseño del prototipo en funcionamiento.

Anexo A. Tabla de Radiación solar extraterrestre en mm/día (Allen et al., 1998)
(Original en MJ·m⁻²·día⁻¹ ; 1 mm/día = 2,45 MJ·m⁻²·día⁻¹)

Tabla de Radiación solar extraterrestre en mm/día (Allen et al., 1998) (Original en MJ·m⁻²·día⁻¹ ; 1 mm/día = 2,45 MJ·m⁻²·día⁻¹)

Latitud	HEMISFERIO NORTE												HEMISFERIO SUR											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
70	0.0	1.1	4.2	9.4	14.4	17.3	16.1	11.4	6.1	2.0	0.0	0.0	16.9	11.7	6.4	2.0	0.1	0.0	0.0	0.9	4.4	9.6	15.2	18.5
68	0.0	1.5	4.8	9.8	14.4	17.1	15.9	11.7	6.6	2.4	0.3	0.0	16.7	12.0	6.9	2.4	0.3	0.0	0.0	1.3	4.9	10.0	15.3	18.2
66	0.2	2.0	5.3	10.1	14.5	16.9	15.8	12.0	7.1	2.9	0.6	0.0	16.7	12.2	7.4	2.9	0.6	0.0	0.2	1.7	5.3	10.4	15.3	18.0
64	0.6	2.4	5.8	10.5	14.7	16.8	15.8	12.2	7.5	3.5	1.0	0.2	16.7	12.6	7.9	3.4	1.0	0.2	0.5	2.2	5.9	10.7	15.5	17.9
62	0.9	2.9	6.3	10.9	14.8	16.8	15.9	12.5	8.0	4.0	1.4	0.5	16.8	12.9	8.3	3.9	1.4	0.5	0.8	2.6	6.3	11.1	15.6	17.9
60	1.3	3.4	6.8	11.2	14.9	16.8	16.0	12.8	8.4	4.4	1.8	0.9	16.9	13.2	8.8	4.4	1.8	0.8	1.2	3.1	6.8	11.5	15.8	17.9
58	1.8	3.9	7.2	11.6	15.1	16.9	16.1	13.1	8.9	4.9	2.2	1.3	17.0	13.5	9.2	4.9	2.2	1.2	1.6	3.6	7.3	11.8	16.0	18.0
56	2.2	4.4	7.7	11.9	15.3	16.9	16.2	13.3	9.3	5.4	2.7	1.7	17.1	13.8	9.6	5.4	2.7	1.6	2.0	4.0	7.8	12.2	16.1	18.0
54	2.7	4.9	8.2	12.2	15.4	16.9	16.2	13.6	9.7	5.9	3.2	2.1	17.2	14.0	10.0	5.9	3.1	2.0	2.4	4.5	8.2	12.5	16.3	18.1
52	3.1	5.4	8.6	12.6	15.6	17.0	16.4	13.8	10.1	6.4	3.7	2.6	17.3	14.3	10.4	6.4	3.6	2.4	2.9	5.0	8.7	12.8	16.4	18.1
50	3.6	5.9	9.1	12.9	15.7	17.0	16.4	14.0	10.5	6.9	4.2	3.1	17.4	14.5	10.9	6.8	4.1	2.9	3.3	5.5	9.1	13.1	16.6	18.2
48	4.1	6.4	9.5	13.1	15.8	17.1	16.5	14.2	10.9	7.4	4.7	3.6	17.5	14.8	11.2	7.3	4.5	3.3	3.8	6.0	9.5	13.4	16.7	18.2
46	4.6	6.9	9.9	13.4	16.0	17.1	16.6	14.4	11.2	7.8	5.1	4.0	17.6	15.0	11.6	7.8	5.0	3.8	4.2	6.4	9.9	13.7	16.8	18.2
44	5.1	7.3	10.3	13.7	16.0	17.1	16.6	14.7	11.6	8.3	5.7	4.5	17.6	15.2	12.0	8.2	5.5	4.3	4.7	6.9	10.3	13.9	16.9	18.2
42	5.6	7.8	10.7	13.9	16.1	17.1	16.7	14.8	11.9	8.7	6.2	5.1	17.7	15.4	12.3	8.7	6.0	4.7	5.2	7.3	10.7	14.2	17.0	18.2
40	6.1	8.3	11.1	14.2	16.2	17.1	16.7	15.0	12.2	9.2	6.7	5.6	17.7	15.6	12.6	9.1	6.4	5.2	5.7	7.8	11.1	14.4	17.1	18.2
38	6.6	8.8	11.5	14.4	16.3	17.1	16.7	15.1	12.5	9.6	7.1	6.0	17.7	15.7	12.9	9.5	6.9	5.7	6.2	8.2	11.4	14.6	17.1	18.2
36	7.1	9.2	11.8	14.6	16.3	17.0	16.7	15.3	12.9	10.0	7.6	6.6	17.7	15.9	13.2	9.9	7.4	6.2	6.6	8.7	11.8	14.8	17.1	18.1
34	7.6	9.7	12.2	14.7	16.3	17.0	16.7	15.3	13.1	10.4	8.1	7.1	17.7	16.0	13.5	10.3	7.8	6.6	7.1	9.1	12.1	15.0	17.1	18.1
32	8.1	10.1	12.5	14.5	16.3	16.9	16.6	15.5	13.4	10.9	8.6	7.6	17.7	16.1	13.8	10.7	8.3	7.1	7.6	9.5	12.4	15.1	17.1	18.0
30	8.6	10.5	12.8	15.0	16.3	16.8	16.6	15.5	13.6	11.3	9.1	8.1	17.6	16.2	14.0	11.1	8.7	7.6	8.0	9.9	12.7	15.3	17.1	17.9
28	9.1	10.9	13.1	15.1	16.3	16.7	16.5	15.6	13.8	11.6	9.5	8.6	17.6	16.2	14.2	11.5	9.2	8.0	8.4	10.3	13.0	15.4	17.1	17.8
26	9.6	11.3	13.4	15.3	16.3	16.6	16.4	15.6	14.1	12.0	10.0	9.1	17.5	16.3	14.4	11.8	9.6	8.5	8.9	10.7	13.3	15.5	17.1	17.7
24	10.0	11.8	13.7	15.3	16.2	16.4	16.3	15.6	14.2	12.3	10.4	9.5	17.3	16.3	14.6	12.2	10.0	8.9	9.3	11.1	13.5	15.6	17.0	17.6
22	10.5	12.1	13.9	15.4	16.1	16.3	16.2	15.7	14.4	12.7	10.9	10.0	17.2	16.4	14.8	12.5	10.4	9.4	9.8	11.5	13.8	15.7	16.9	17.4
20	10.9	12.5	14.2	15.5	16.0	16.1	16.0	15.6	14.6	13.0	11.3	10.4	17.1	16.3	14.9	12.8	10.9	9.8	10.2	11.8	14.0	15.8	16.8	17.2
18	11.4	12.9	14.4	15.5	15.9	16.0	15.9	15.6	14.7	13.3	11.7	10.9	16.9	16.3	15.1	13.1	11.2	10.2	10.6	12.2	14.2	15.8	16.7	17.0
16	11.8	13.2	14.6	15.6	15.8	15.8	15.7	15.6	14.9	13.6	12.1	11.4	16.8	16.3	15.2	13.4	11.6	10.7	11.0	12.5	14.4	15.8	16.6	16.8
14	12.2	13.5	14.7	15.6	15.7	15.6	15.6	15.5	15.0	13.8	12.5	11.8	16.6	16.2	15.3	13.6	12.0	11.1	11.4	12.8	14.5	15.8	16.4	16.6
12	12.6	13.8	14.9	15.5	15.5	15.3	15.3	15.4	15.1	14.1	12.9	12.2	16.4	16.2	15.4	13.9	12.3	11.5	11.8	13.1	14.7	15.8	16.2	16.3
10	13.0	14.1	15.1	15.5	15.3	15.1	15.1	15.3	15.1	14.3	13.2	12.7	16.1	16.0	15.4	14.1	12.7	11.9	12.2	13.4	14.8	15.7	16.0	16.1
8	13.4	14.4	15.2	15.4	15.1	14.8	14.9	15.2	15.2	14.5	13.6	13.1	15.9	15.9	15.5	14.3	13.0	12.2	12.5	13.6	14.9	15.7	15.8	15.8
6	13.8	14.6	15.3	15.3	14.9	14.6	14.7	15.1	15.2	14.7	13.9	13.4	15.6	15.8	15.5	14.5	13.3	12.6	12.9	13.9	15.0	15.6	15.6	15.5
4	14.1	14.9	15.3	15.3	14.7	14.3	14.4	14.9	15.2	14.9	14.2	13.8	15.3	15.6	15.5	14.7	13.6	13.0	13.2	14.1	15.1	15.5	15.3	15.2
2	14.4	15.1	15.4	15.1	14.4	14.0	14.1	14.7	15.2	15.1	14.5	14.2	15.1	15.5	15.5	14.9	13.9	13.3	13.5	14.4	15.1	15.4	15.1	14.9
0	14.8	15.3	15.5	15.0	14.2	13.6	13.8	14.6	15.2	15.3	14.8	14.5	14.8	15.3	15.5	15.0	14.2	13.6	13.8	14.6	15.2	15.3	14.8	14.5

Anexo B. Tabla de Riegos programados marzo – octubre 2023

Rancho El Regalo Ascension Chih., Calendario de Riegos 2023						
Tipo de riego: Toro Microaspersión (34 lph)						
Fecha	Hora inicio	Hora de finalización	Total de horas	Total de hectareas	lph	total vol
15/03/2023	6:00 p. m.	7:00 a. m.	13	3,8	34	442
23/03/2023	3:00 p. m.	7:00 a. m.	16	3,8	34	544
27/03/2023	3:00 p. m.	7:00 a. m.	16	3,8	34	544
5/04/2023	9:00 a. m.	8:00 a. m.	23	3,8	34	782
10/04/2023	3:00 p. m.	7:00 a. m.	16	3,8	34	544
11/04/2023	3:00 p. m.	7:00 a. m.	16	3,8	34	544
16/04/2023	3:00 p. m.	7:00 a. m.	16	3,8	34	544
24/04/2023	2:00 p. m.	7:00 a. m.	17	3,8	34	578
26/04/2023	2:00 p. m.	7:00 a. m.	17	3,8	34	578
1/05/2023	4:00 p. m.	8:00 a. m.	16	3,8	34	544
2/05/2023	10:00 a. m.	10:00 a. m.	24	3,8	34	816
8/05/2023	3:00 p. m.	6:00 p. m.	27	3,8	34	918
15/05/2023	10:00 a. m.	10:00 a. m.	24	3,8	34	816
17/05/2023	7:00 a. m.	7:00 a. m.	24	3,8	34	816
22/05/2023	3:00 p. m.	7:00 a. m.	16	3,8	34	544
24/05/2023	3:00 p. m.	7:00 a. m.	16	3,8	34	544
30/05/2023	6:00 p. m.	7:00 a. m.	13	3,8	34	442
2/06/2023	3:00 p. m.	2:00 p. m.	23	3,8	34	782
7/06/2023	8:00 a. m.	7:00 a. m.	23	3,8	34	782
18/06/2023	8:00 a. m.	7:00 a. m.	23	3,8	34	782

20/06/2023	12:00 p. m.	8:00 a. m.	20	3,8	34	680
22/06/2023	2:00 p. m.	6:00 p. m.	28	3,8	34	952
25/06/2023	6:00 a. m.	6:00 a. m.	24	3,8	34	816
29/06/2023	6:00 a. m.	6:00 a. m.	24	3,8	34	816
4/07/2023	2:00 a. m.	11:00 a. m.	21	3,8	34	714
7/07/2023	7:00 a. m.	2:00 a. m.	19	3,8	34	646
8/07/2023	12:00 p. m.	8:00 p. m.	8	3,8	34	272
9/07/2023	6:00 a. m.	7:00 a. m.	25	3,8	34	850
15/07/2023	6:00 a. m.	6:00 a. m.	24	3,8	34	816
24/07/2023	6:00 a. m.	6:00 a. m.	24	3,8	34	816
27/07/2023	12:00 p. m.	7:00 a. m.	17	3,8	34	578
30/07/2023	7:00 a. m.	7:00 a. m.	24	3,8	34	816
2/08/2023	2:00 p. m.	7:00 p. m.	5	3,8	34	170
3/08/2023	6:00 a. m.	2:00 p. m.	32	3,8	34	1088
7/08/2023	6:00 a. m.	6:00 a. m.	24	3,8	34	816
10/08/2023	7:00 a. m.	7:00 a. m.	48	3,8	34	1632
15/08/2023	9:00 a. m.	7:00 a. m.	46	3,8	34	1564
21/08/2023	7:00 a. m.	7:00 a. m.	48	3,8	34	1632
28/08/2023	7:00 a. m.	7:00 a. m.	24	3,8	34	816
31/08/2023	7:00 a. m.	7:00 p. m.	36	3,8	34	1224
4/09/2023	7:00 a. m.	7:00 a. m.	48	3,8	34	1632
8/09/2023	2:00 p. m.	2:00 p. m.	48	3,8	34	1632
14/09/2023	1:00 p. m.	7:00 a. m.	18	3,8	34	612
22/09/2023	1:00 p. m.	12:00 p. m.	47	3,8	34	1598

2/10/2023	7:00 a. m.	7:00 p. m.	60	3,8	34	2040
8/10/2023	7:00 a. m.	7:00 p. m.	60	3,8	34	2040
16/10/2023	7:00 a. m.	7:00 a. m.	48	3,8	34	1632
23/10/2023	7:00 a. m.	7:00 p. m.	36	3,8	34	1224
29/10/2023	7:00 p. m.	7:00 a. m.	12	3,8	34	408
30/10/2023	7:00 a. m.	7:00 p. m.	36	3,8	34	1224
8/11/2023	6:00 a. m.	6:00 p. m.	12	3,8	34	408
10/11/2023	6:00 a. m.	11:00 a. m.	29	3,8	34	986

46036

Lamina tradicional considerada: 1.7 m x 40 000 m² (4 has huerto) lo que representa un volumen de 68000m³/año

Pozo:10lps (36000 lph)

1354 hrs x 36000 lph=48744 m³/año

68000 (riego tradicional) vs 48744 (micro-aspersión) con un ahorro de 28-30%

Volumen Concesionado: 240,000 m³/año (la huerta consume solo el 20.3% del volumen concesionado anual)

Con el volumen actual bombeado (36000 lph) se pueden regar aproximadamente 1060 árboles (~10 has al 10x10 ~100/ha)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abudu, S., Sheng, Z., Michelsen, A., Rodriguez, O., & King, J. (2016). Evapotranspiration and crop coefficient for pecan trees in El Paso, Texas. *2016 Irrigation Show and Education Conference, December*, 0–8.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Parte C. Evapotranspiración del cultivo en condiciones no estándar ET c bajo condiciones de estrés hídrico. *Evapotranspiración Del Cultivo Guías Para La Determinación de Los Requerimientos de Agua de Los Cultivos. ESTUDIO FAO RIEGO Y DRENAJE 56.*, 48.
- Banco Mundial. (2021). El agua en la agricultura. In *Entendiendo a la pobreza*. <https://www.bancomundial.org/es/topic/water-in-agriculture#1>
- Bongiovanni, R., Mantovani, E. C., Best, S., & ROEL, A. (Ed.). (2006). *Agricultura de precisión integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. Procisur/IICA.
- Brenes, J. A., Martínez, A., Quesada-López, C., & Jenkins, M. (2019). *Sistemas de apoyo a la toma de decisiones que usan inteligencia artificial en la agricultura de precisión: un mapeo sistemático de literatura*.
- CECATEV UACJ. (2022). *LCCA - UACJ. Datos Meteorológicos*. <http://cecatev.uacj.mx/Estacion04/>
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). Hidrología aplicada. In *Hidrologia aplicada* (p. 575 pp). <http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/?IsisScript=iah/iah.xis&src=google&base=REPIDISCA&lang=p&nextAction=lnk&exprSearch=158911&indexSearch=ID>
- CONAGUA. (2019). *Estadísticas del Agua en México 2019*. Estadísticas Del Agua En México 2019. http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2019.pdf
- FAO - UN. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. ESTUDIO FAO RIEGO Y DRENAJE*. <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>
- FONADE, IDEAM, & Fernandez, M. (Ideam). (2013). *Diagnóstico de modelos agroclimáticos*.
- Galaviz Aragonés, R. (2022). *Estudio de la Distribución Geospacial de Suelos Hidrográficos para el monitoreo de la Evapotranspiración en un predio agrícola utilizando Multidepth Sensors en Ascensión, Chih*. Universidad Autonoma de Ciudad Juarez.
- Garcia, A. (2003). *Manual Práctico de SQL*.
- García, E., & Flego, F. (2008). Agricultura de Precisión. *TECNOLOGÍA AGROPECUARIA* , 99–

- Goldhamer, D. A. (2002). *Drought Irrigation Strategies for Deciduous Orchards* (U. C. Extension & D. of A. and N. Resources (eds.); UC Coopera).
- Granados-Olivos, A., Corral - Diaz, R., & Esquivel-Ceballos, V. (2021). El futuro del Agro en México: Así como “Sin Maíz - No hay País”; también, “Sin Smart Farming - No habrá alimentación suficiente”; y “Sin Agricultura Regenerativa - No habrá humanidad”. *Rake_Dos_Oficial*, 2.
- Gutiérrez, F., Htun, N. N., Schlenz, F., Kasimati, A., & Verbert, K. (2019). A review of visualisations in agricultural decision support systems: An HCI perspective. *Computers and Electronics in Agriculture*, 163. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.053>
- López Avendaño, J., Díaz Valdés, T., Watts Thorp, C., Rodríguez, J. C., Castellanos Villegas, A., Partida Ruvalcaba, L., & Velázquez Alcaraz, T. (2015). *Evapotranspiration and Crop Coefficient of Bell Pepper in Culiacan Valley, Mexico*.
- López, R., Medina, M., Flores, I., Rivera, M., Suárez, S., & Esperanza, N. (2021). CULTIVO DE NOGAL PECANERO EN LA COSTA DE HERMOSILLO ASOCIADO A SU RENTABILIDAD, CICLO 2020. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 48.
- Lozoya, C., Mendoza, C., Aguilar, A., Román, A., & Castelló, R. (2016). Sensor-Based Model Driven Control Strategy for Precision Irrigation. *Journal of Sensors*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/9784071>
- Microsoft®, A. (2022). *Arquitectura de la inteligencia artificial (IA) - Azure Architecture Center | Microsoft Docs*. <https://docs.microsoft.com/es-ES/azure/architecture/data-guide/big-data/ai-overview>
- Microsoft. (2022). *Identificación de los formatos de datos - Learn | Microsoft Docs*. <https://docs.microsoft.com/es-mx/learn/modules/explore-core-data-concepts/2-data-formats>
- Nievola, C. C., Carvalho, C. P., Oria Carvalho, V., & Rodrigues, E. (2017). Rapid responses of plants to temperature changes. *Temperature*, 4. <https://doi.org/10.1080/23328940.2017.1377812>
- Ojeda-Barrios, D. L., María, A., Vota, A., Adriana Hernández-Rodríguez, O., César, J., Díaz, L., Valdés, A. A., & Denogean Ballesteros, F. G. (2010). *ANÁLISIS FODA Y PERSPECTIVAS DEL CULTIVO DEL NOGAL PECANERO EN CHIHUAHUA*.
- Quille-Mamani, J., Fernandez, L. R., & Ontiveros-Capturata, R. (2021). Estimation of rice crop evapotranspiration in Perú. *Revista de Teledetección*, 58, 23–38.
- Ranveer, C., Deepak, V., Zerina, K., Jongho, W., Xinxin, J., & Madhusudhan, S. (2017, March 27). *FarmBeats: An IoT Platform for Data-Driven Agriculture*. 14th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI '17). <https://www.usenix.org/system/files/conference/nsdi17/nsdi17-vasisht.pdf>

- Rodríguez, J., Watts, C., Garatuza, P., Lizárraga-celaya, J., Grageda, C., & Renteria, M. (2011). *EVAPOTRANSPIRACIÓN Y BALANCE HÍDRICO EN NOGAL PECANERO (Carya illinoensis K. Koch) EN LA COSTA DE HERMOSILLO, MÉXICO*. 692–698.
- Ruíz Álvarez, O., Corrales Suastegui, A., González Jasso, L. A., Díaz García, L. A., Narváez Mendoza, M. P., Ontiveros Capurata, R. E., & Ruíz Corral, J. A. (2018). Comportamiento espacio temporal de la evapotranspiración de referencia en la República Mexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(10), 1963–1976. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i10.1037>
- Salinas, M. G. (2017). Científico de datos: codificando el valor oculto e intangible de los datos Data scientist: encoding the hidden and intangible value of the data. *Revista Digital Universitaria*, 18. <https://doi.org/10.22201/codeic.16076079e.2017.v18n7.a2>
- Samani, Z. (2000). ESTIMATING SOLAR RADIATION AND EVAPOTRANSPIRATION USING MINIMUM CLIMATOLOGICAL DATA. *JOURNAL OF IRRIGATION AND DRAINAGE ENGINEERING*, 1–3.
- Samani, Z., Salim, A. A., Ae, B., Ae, M. B., Skaggs, R., John, A. E., Ae, L., Ae, V. D. T., & Pinon, A. (2009). Using remote sensing to evaluate the spatial variability of evapotranspiration and crop coefficient in the lower Rio Grande Valley, New Mexico. *IRRIG SCI*, 93–100. <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0178-8>
- Sammis, T. W., Mexal, J. G., & Miller, D. (2004). Evapotranspiration of flood-irrigated pecans. *Agricultural Water Management*, 69(3), 179–190. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.05.005>
- Sánchez San Román, J. (2017). *Hidrología superficial y subterránea* (1st ed.). SafeCreate.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, & Gobierno | gob.mx. (2017, January 7). *Se incrementa 83 por ciento la producción de nuez en México* |. Comunicado Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/se-incrementa-83-por-ciento-la-produccion-de-nuez-en-mexico>
- Sensoterra. (2023). *2301_Soil_Calibration_Guide_compressed.pdf* (pp. 25–31).
- Sharabi Kesem, Bar Paulin, & Follis K. (2022). *Create template apps in Power BI - Power BI | Microsoft Docs*. Create a Template App in Power BI. <https://docs.microsoft.com/en-us/power-bi/connect-data/service-template-apps-create>
- Sian, T. Y., & Dam, R. (2022, June 27). *What is Design Thinking and Why Is It So Popular?* <https://www.interaction-design.org/>.
- SIAP. (2021). *Datos Abiertos*. Estadística de Producción Agrícola 2020. <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>
- Sifuentes Ibarra, E., Samaniego Gaxiola, J. A., Anaya Salgado, A., Núñez Moreno, J. H., Valdez Gascón, B., Gutiérrez Soto, R. G., & Macías Cervantes, J. (2015). Programación del riego en

nogal pecanero (*Carya illinoensis*), mediante un modelo integral basado en tiempo térmico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* , 6, 1892–1902.

Tarango, R. S. (2015). Paquete Tecnológico para Nogal pecanero. *Instituto Nacional de Invetigaciones Forestales y Agrícolas*.

Tianxing, Z., Yan, Z., Ming, Y., Jinzhong, Y., Biao, J., Wei, M., & Jingwei, W. (2022). A new approach for estimating spatial-temporal phreatic evapotranspiration at a regional scale using NDVI and water table depth measurement. *Agricultural Water Management*, 1–21.

UNESCO. (2016). *Goal 9: Build resilient infrastructure, promote inclusive and sustainable industrialization and foster innovation*. http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/ier2015_en.pdf

Wang, J., Sammis, T. W., Andales, A. A., Simmons, L. J., Gutschick, V. P., & Miller, D. R. (2007). Crop coefficients of open-canopy pecan orchards. *Agricultural Water Management*, 88(1–3), 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.11.003>

Wicaksana, A. (2016). Vantage Vue Console Manuale. In [Https://Medium.Com/](https://Medium.Com/). <https://medium.com/@arifwicaksanaa/pengertian-use-case-a7e576e1b6bf>