

**ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO (CWSI) A PARTIR DEL USO DE
IMÁGENES TÉRMICAS DE UN CULTIVO DE PAPA (*SOLANUM TUBEROSUM*) EN LA
VEREDA ALTO DEL SOTE EN EL MUNICIPIO DE MOTAVITA BOYACÁ**

AUTORES:

DANIEL ESTEBAN FANDIÑO PEÑA

NICOLAS RODRIGUEZ ROBERTO

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TUNJA

2023

**ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO (CWSI) A PARTIR DEL USO DE
IMÁGENES TÉRMICAS DE UN CULTIVO DE PAPA (*SOLANUM TUBEROSUM*) EN LA
VEREDA ALTO DEL SOTE EN EL MUNICIPIO DE MOTAVITA BOYACÁ**

AUTORES:

DANIEL ESTEBAN FANDIÑO PEÑA

NICOLAS RODRIGUEZ ROBERTO

DIRECTOR: PHD(C) M.SC. ESP. ING EDGAR ANDRES GUTIÉRREZ CÀCERES

CODIRECTOR ING. MSC. IVAN GUSTAVO PIRAZAN CUERVO

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIEROS AMBIENTALES

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TUNJA

2023

Nota de aceptación

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

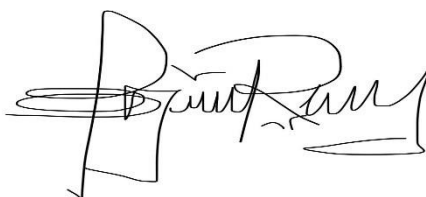
EXONERACIÓN DE RESPONSABILIDADES

Los conceptos desarrollados, investigaciones realizadas, practicas elaboradas, análisis y conclusiones del presente proyecto son de exclusividad responsabilidad del autor. Dejo constancia que cedo los derechos de propiedad intelectual a la Universidad Santo Tomas seccional Tunja, según lo establecido por la ley No. 1915 del 12 de Julio de 2018, ley de propiedad intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

AUTORES



Daniel Esteban Fandiño Peña



Nicolas Rodríguez Roberto

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad, la facultad y a sus integrantes por abrirnos sus puertas, por sus enseñanzas, consejos y formarnos como profesionales.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	9
1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. Planteamiento del problema	13
1.2 Justificación.....	14
2. OBJETIVOS.....	15
2.1. Objetivo general.....	15
2.2. Objetivos específicos	15
3. MARCO REFERENCIAL.....	16
3.1. Marco contextual	16
3.2. Marco antecedentes	17
3.3. Marco teórico	20
3.4. Marco conceptual.....	24
3.5. Marco legal	26
4. IMPACTO AMBIENTAL O PERTINENCIA SOCIAL	28
5. PRESUPUESTO	29
6. METODOLOGIA.....	30
6.1. Primera Etapa (1)	31
6.2. Segunda etapa (2).....	34
6.3. Tercera parte (3)	40
7. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	41
7.1. Reconocimiento del área de estudio	41
7.2. Procesamiento de datos fotogramétricos	41
7.3. Cálculo del índice estrés hídrico (CWSI)	44
7.4. Análisis del estrés hídrico a lo largo del ciclo fenológico en el cultivo	50
7.5. Estrategia de aprovechamiento del recurso hídrico para tener un control satisfactorio del CWSI en cultivos de papa.	54
8. CONCLUSIONES.....	60
9. RECOMENDACIONES	62
10. BIBLIOGRAFÍA.....	63
11. ANEXOS.....	67

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Ubicación del Municipio de Motavita Boyacá.....	17
Ilustración 2 Ciclo Fenológico del cultivo de papa	21
Ilustración 3: Diagrama Metodológico.....	31
Ilustración 4: Distribución de estaciones meteorológicas	33
Ilustración 5 Ejemplo de planeación de ruta en Pix4dcapture.....	34
Ilustración 6: Modelo puntos clave	43
Ilustración 7: Modelo del terreno digital vuelo 4	44
Ilustración 8: Ortomosaico del vuelo número 3	45
Ilustración 9: Mapa de índice de estrés hídrico vuelo número 3	46
Ilustración 10: Ortomosaico del vuelo número 4	47
Ilustración 11: Mapa de índice de estrés hídrico vuelo número 4	48
Ilustración 12 Mapa de CWSI Vuelo 7.....	49
Ilustración 13 Ortomosaico vuelo 7	49

LISTA DE GRAFRICAS

Gráfica 1: Caudales mensuales multianual (m^3/seg)	52
Gráfica 2: Precipitación mensual periodo 2022-2023	53

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1: CWSI Según Idso y Jackson (1981).....	23
Ecuación 2: Formula de CWSI aplicada al software Pix4D.....	35
Ecuación 3. Precipitación Efectiva.....	37
Ecuación 4. Retención Potencial Máxima.....	37
Ecuación 5: Curve Number en condiciones de humedad antecedente seca	38
Ecuación 6. Curve Number en condiciones de humedad antecedente promedio	38
Ecuación 7. Curve Number en condiciones de humedad antecedente húmeda.....	38
Ecuación 8. Infiltración de la cuenca	38
Ecuación 9. Evapotranspiración	38
Ecuación 10. Percolación	39
Ecuación 11. Escorrentía subterránea.....	39
Ecuación 12. Escorrentía total de la cuenca	39

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Presupuesto del proyecto.....	29
Tabla 2: Cantidad de imágenes obtenidas por vuelo	42

Tabla 3: Tabla de Caudales mensuales multianual (m ³ /seg).....	51
Tabla 4: Tabla de precipitación mensual periodo 2022-2023	53

RESUMEN

El recurso hídrico es de gran importancia para la agricultura ya que es uno de los principales factores de productividad, por esta razón se estimó el comportamiento de las plantas en relación con la disponibilidad del agua, esto por medio del CWSI que permitió valorar la relación de transpiración en las plantas, obteniendo como consecuencia que al ser mayor la transpiración que la absorción genera un caso de estrés hídrico y posteriormente la posible muerte de la planta. En este estudio se realizó la recolección de información con respecto a los cultivos de papa y el comportamiento del CWSI identificado por la toma de imágenes térmicas que permitió conocer el estado de transpiración de la planta donde posteriormente se realizó una comparación con la planta que presento el estrés hídrico, relacionando así el desarrollo de su ciclo fenológico y generando nuevas técnicas con las que se beneficiaran los agricultores por medio de una propuesta pertinente al uso eficiente del recurso hídrico. Para ello se implementó la siguiente metodología que tuvo como finalidad las siguientes etapas: 1) Recopilación de información de los cultivos de papa, el CWSI y el comportamiento que éste ejerce al cultivo dentro del mismo y la influencia en su desarrollo. 2) Evaluación en la zona de estudio por medio de la toma de imágenes fototérmicas que permitan conocer el estado de transpiración en la planta, 3) Análisis del estrés hídrico a lo largo del ciclo fenológico en el cultivo para formular una estrategia en el uso eficiente del recurso hídrico, estipulando el manejo del recurso hídrico adecuado con relación a una mayor efectividad en los cultivos y poder así contribuir con una agricultura sostenible desde el punto de vista hídrico.

PALABRAS CLAVE

Estrés hídrico, cultivo de papa, transpiración, imágenes térmicas, fotogrametría.

ABSTRACT

The water resource is of great importance for agriculture because it is one of the main factors for its productivity, so it is necessary to estimate the behavior of plants in relation to water availability, which leads to implement different systems for monitoring them to increase the efficiency of productivity in agriculture, Among these is the water stress index (CWSI), which allows estimating the ratio of transpiration in plants with respect to the water absorbed by their roots; consequently, if transpiration is higher than absorption, it would generate a case of water stress and subsequently the possible death of the plant. This study seeks the collection of information regarding potato crops and the behavior that causes the CWSI, identified by taking thermal images that allow knowing the state of transpiration of the plant to later make a comparison where water stress is present in the plant, thus relating the development in its phenological cycle so new technologies and techniques are proposed with which farmers will benefit through a proposal relevant to the efficient use of water resources.

The methodology for the achievement of this purpose is divided into the following stages: 1) Compilation of information regarding potato crops, the index of water stress and the behavior that this exerts on the crop within the same and the influence on its development. 2) Evaluation in the study area by taking photothermal images that allow knowing the state of transpiration in the plant, 3) Analysis of water stress throughout the phenological cycle in the crop to formulate a strategy in the efficient use of water resources, thus stipulating the appropriate water resource management in relation to greater effectiveness in crops and thus contribute to a sustainable agriculture from the water point of view.

KEY WORDS

Water stress, potato crop, transpiration, thermal imaging, photogrammetry.

1. INTRODUCCIÓN

La papa (*Solanum Tuberosum*), hace parte de uno de los cultivos más importantes de la industria alimentaria para los seres humanos, teniendo un valor nutricional, versatilidad culinaria y adaptabilidad a diversos entornos, es indispensable ya que esta forma parte del cuarto cultivo en área sembrada en el país (Devaux, Kromann, & Ortiz, 2014). Los tubérculos de papa son una fuente valiosa de carbohidratos, minerales y vitaminas, lo que lo convierte en un alimento básico para las personas, Colombia es el mayor productor, exportador y consumidor de este tipo de papa, puesto que representa en un 16% a la papa diploide amarilla (Barragan, 2019) esto hace que contribuya a la economía del país, teniendo en cuenta que por su excelente calidad es muy acogida por lo tanto es evidente que esta presenta características que la hacen muy atractivas, como su sabor, textura, lo que aumenta su consumo y así mismo incrementa disposición y petición (Sostenible, 2019).

La región de Boyacá está ligada a una parte importante de la zona andina del país donde el cultivo de tubérculos resuena con la esencia cultural de los habitantes rurales. Esta tradición se remonta a tres grupos antiguos: los paeces, muisca y laches (Aguirre Forero, 2012). Por ende, cabe resaltar que para el departamento dicho cultivo representa una de las principales actividades económicas, con alrededor de 80 municipios que se dedican a la cosecha y producción de este (Alvarado G., 2007). Por otro lado, las plantas de papa *Solanum Tuberosum* son muy sensibles a las condiciones climáticas puesto que la mayoría de las variedades tradicionales de papa no están adaptadas a condiciones extremas de temperatura, por lo tanto, esto puede resultar en las disminuciones de rendimientos e incluso en la pérdida total de las cosechas (Magnus, Sharda, & Zhang, 2016).

De acuerdo con las pérdidas ocasionadas en Colombia por estos fenómenos meteorológicos, se ha considerado estudiar la manera en que se pueda combatir y plantear un sistema innovador que proteja el estado de los cultivos y la economía de los agricultores (Snyder & Matulich, 2010).

Estas respuestas al estrés hídrico son mecanismos de supervivencia que permite a las plantas de papa generar o estabilizar el equilibrio entre el suministro de agua y la demanda de la planta, sin embargo, si se presenta un estrés hídrico en alto nivel puede llegar a afectar el crecimiento y el rendimiento de la planta, es por esto por lo que se genera un proyecto que busca proyectar prácticas de gestión del agua adecuadas para optimizar el crecimiento y producción de la *Solanum Tuberosum*. Este proyecto tiene como objetivo evaluar la tensión del agua (CWSI) utilizando

imágenes térmicas para comprender el uso del recurso hídrico en un campo de papa *Solanum tuberosum* en el pueblo Alto del Sote, Motavita Boyacá. Mediante el procesamiento de imágenes termográficas de drones para determinar el CWSI, también pretendemos contrastar el crecimiento de las plantas en función del índice de tensión del agua a lo largo de su ciclo de crecimiento con puntos de referencia para un cultivo efectivo. En conclusión, nuestro objetivo es diseñar una estrategia, basada en la investigación bibliográfica, para gestionar los recursos hídricos para regular de manera óptima (CWSI) en los campos de papa.

1.1. Planteamiento del problema

Colombia cuenta con algunos de los recursos hídricos más abundantes del mundo, pero se enfrenta a los desafíos de los cambios climáticos debido a los cambios territoriales y la extracción de recursos. La disponibilidad insuficiente de agua surge como un problema multifacético, que abarca dimensiones sociales, ambientales y económicas. No solo afecta a las comunidades residentes y los ecosistemas locales, sino que también provoca diversas repercusiones inducidas por el hombre (Lopera Gómez, Campos, & Olarte, 2012).

Boyacá es una de las principales fuentes de producción agrícola en el país, desempeñándose gracias a su diversidad de pisos térmicos, así como su gran variedad de fuentes alimentarias entre estas encontrando los cultivos de papa. En la actualidad el 70% del agua dulce disponible captada se destina para las producciones agrícolas, teniendo una relación directamente proporcional entre la cantidad y calidad del recurso respecto a la eficiencia de crecimiento del cultivo, por ende, es de suma importancia monitorear el acceso hídrico en las diferentes etapas del ciclo fenológico de un cultivo; permitiendo así una alta productividad y disminución de riesgos en la pérdida de la cosecha. Uno de los múltiples sistemas en el monitoreo de estos individuos vegetales es el indicador de estrés hídrico (CWSI), el cual permite estimar la relación de transpiración en las plantas respecto al agua absorbida por las raíces de las mismas, por medio del análisis de la temperatura del individuo, conllevando a un análisis respecto a los requerimientos hídricos que necesita un cultivo y permitiendo proponer sistemas tanto de riego como de drenajes en las zonas para reducir el estrés hídrico de cada individuo vegetal.

Por lo anterior el problema central que busca resolver esta investigación es conocer los impactos que se generen en el desarrollo fenológico de un cultivo de papa afectado por los diferentes factores en disponibilidad del recurso hídrico y la importancia que este genera en la productividad, para ello es necesario establecer el índice de estrés hídrico se determina considerando las temperaturas individuales de las plantas, monitoreadas a través de imágenes termográficas tomadas por drones, con apoyo de investigaciones de la Universidad Santo Tomás. Esta iniciativa se basa en una extensa investigación, que brinda información para la aplicación efectiva de imágenes térmicas para detectar el estrés hídrico en los cultivos de papa. Los agricultores pueden identificar cuándo los cultivos son vulnerables a los cambios climáticos y meteorológicos. Este conocimiento ayuda en

la gestión eficiente de los recursos naturales mediante la implementación de un sistema de riego más receptivo durante los episodios de escasez de agua para las plantas.

1.2 Justificación

Esta iniciativa se centra en examinar el índice de estrés hídrico como un enfoque sostenible para la agricultura, reconociendo que la agricultura juega un papel fundamental en la economía de nuestra nación. Más allá de simplemente contribuir a la producción de alimentos, indirectamente asegura el bienestar nutricional de nuestros ciudadanos. En particular, gran parte de nuestro sector agrícola se basa en métodos antiguos, con una adopción mínima de técnicas y herramientas contemporáneas que pueden mejorar la productividad al tiempo que garantizan un uso eficiente de los recursos naturales (Perfetti, Balcazar, & Antonio, 2013). Además, la agricultura sostenible se entiende como una serie de sistemas de producción que contribuyen a las mejoras sistemáticas con relación a las problemáticas actuales, que subyacen de las actividades agrícolas que generan alteraciones a las funciones socioambientales de los ecosistemas como el uso inadecuado de los suelos y el mal manejo del uso y aprovechamiento del recurso hídrico en los sistemas de riego (Ruiz, Martinez, & Figueroa, 2015).

Nuestro objetivo es estudiar el (CWSI) porque a menudo subyace a la degradación de las plantas, principalmente debido a la transpiración excesiva durante la absorción de agua por las raíces. Para monitorear este índice, estamos utilizando imágenes térmicas en una finca de papa (*Solanum tuberosum*) ubicada en la vereda Alto del Sote, Motavita Boyacá. Esto permite la supervisión remota del riego y señala las ineficiencias en el sistema de riego. El objetivo es proporcionar a los agricultores conocimientos prácticos, promoviendo el uso juicioso de los recursos naturales. También pretendemos abordar los desafíos ambientales y sociales que plantea la agricultura, especialmente dados los cambios climáticos adversos causados por los malos hábitos agrícolas. Hacer hincapié en las prácticas agrícolas mejoradas puede mejorar la productividad de las plantas (Luna, Estrada, Jiménez, & Pinzón, 2012).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Analizar el índice de estrés hídrico (CWSI) a partir del uso de imágenes térmicas para el aprovechamiento del recurso hídrico en un cultivo de papa (*solanum tuberosum*) en la vereda Alto del Sote en el municipio de Motavita Boyacá.

2.2. Objetivos específicos

- Calcular y analizar el índice de estrés hídrico (CWSI) por medio del procesamiento de imágenes fototérmicas por termometría captadas por dron.
- Comparar el desarrollo de las plantas en base al índice de estrés hídrico en el ciclo fenológico en relación con el balance hídrico de la zona del cultivo.
- Formular por medio de un estudio bibliográfico una estrategia de aprovechamiento del recurso hídrico para tener un control satisfactorio del (CWSI) en cultivos de papa.

3. MARCO REFERENCIAL

3.1. Marco contextual

Colombia se encuentra entre las principales naciones agrícolas del mundo. La agricultura ha sido fundamental para su crecimiento económico, cultural, social, político y tecnológico. Este sector ha influido tanto en entornos rurales como urbanos a través de sus sistemas productivos multifacéticos. (Santa Coloma, 2015). La mayoría de los cultivos en Colombia están relacionados al autoconsumo, también se tienen algunos cultivos comerciales las exportaciones incluyen café, yuca, banano, papaya, cítricos, maíz y papa. Las grandes empresas también manejan cultivos agroindustriales como la palma africana y la caña de azúcar. (Perfetti, Balcázar, & Hernández, 2013). La papa es un cultivo importante en Colombia, con un consumo anual per cápita de 57 kg. Alrededor del 93% de su producción es para consumo directo y el 7% se destina a procesamiento industrial. Cultivada en 9 departamentos, pequeños productores impulsan la producción nacional, que asciende a 2,5 millones de toneladas anuales (ICA, 2011).

El departamento de Boyacá se caracteriza por su tradición agropecuaria, siendo la papa el producto principal y más característico del departamento con una representación del 80% de los cultivos transitorios, las variedades cultivadas se caracterizan por ser principalmente las consideradas más comerciales en el mercado como la papa r12, la pastusa y la Betina variedades con altos niveles de productividad y con un ciclo de producción que permite satisfacer las necesidades y demandas del mercado (Nely Pérez Martínez, 2021).

El municipio de Motavita está ubicado en la provincia Central de Boyacá. Si bien su región urbana ocupa una meseta, gran parte de Motavita abarca terrenos montañosos, que van desde los 2690 a los 3240 metros sobre el nivel del mar. En consecuencia, las temperaturas oscilan entre los 11°C y los 14°C. En el municipio, la agricultura domina como actividad económica principal, siendo la papa el cultivo predominante. Sin embargo, también se cultivan otros cultivos como maíz, cebada, trigo y guisantes. Otras de las actividades representativas son la ganadería para producción de leche y algunas actividades mineras para la producción de carbón. Según el Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) el municipio presenta amenazas potenciales como Inundaciones, sequías, inestabilidad de taludes y heladas. (Motavita, 2012)

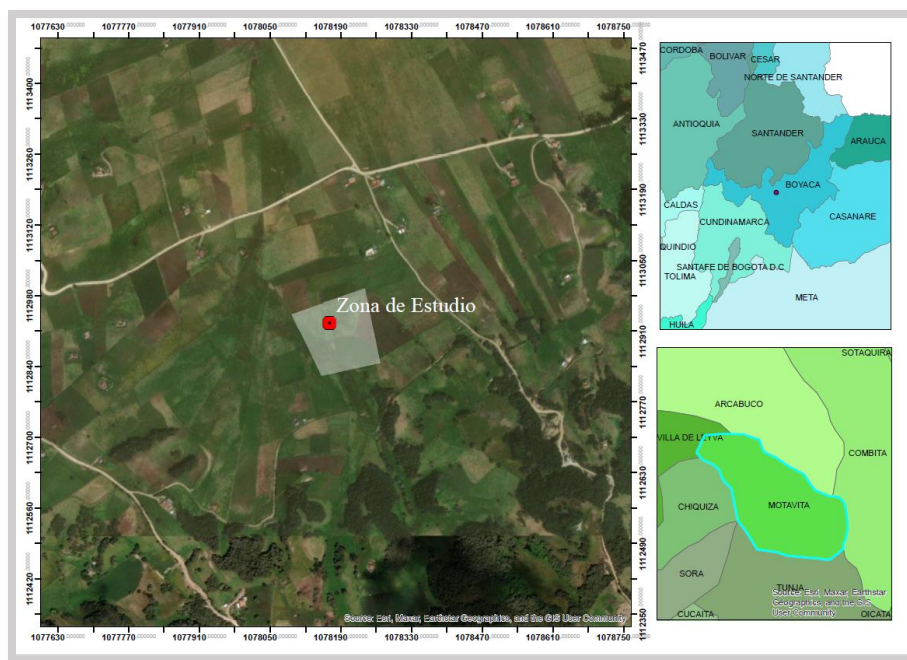


Ilustración 1: Ubicación del Municipio de Motavita Boyacá

Fuente: Google Earth (Arcgis)

3.2. Marco antecedentes

3.2.1. CWSI: Evaluación del índice de estrés hídrico (CWSI) en diferentes estudios relacionados a cultivos.

Las iniciativas para evaluar el índice de estrés hídrico en la agricultura han sido ampliamente discutidas en fuentes académicas. Estos estudios tienen como objetivo analizar el índice de estrés hídrico bajo diferentes configuraciones de riego utilizando métodos de dispersión. Observan las respuestas de los cultivos en línea con los resultados de las técnicas de cálculo de CWSI para determinar la relevancia del método en el mundo real en la programación del riego para plantas agrícolas.

Se encontró en la investigación de Bozkurt (2015) el planteamiento relacionado a la programación de riego basada en la medición del contenido de agua del suelo o parámetros meteorológicos y variables como son la temperatura, al igual que, algunas variables del suelo como la humedad determinando así una comparativa bajo 3 tratamientos diferente de riego por goteo evidenciando

así como las plantas cambian sus propiedades en la cosecha del fruto cuando son sometidas a un estrés hídrico y a su vez cómo se puede efectuar una cuantificación controlada y efectiva del recurso hídrico para la modernización o cálculo de la evapotranspiración, al igual que, la relación del comportamiento de la temperatura de la planta en condiciones de estrés y de no estrés para proporcionar los signos del crecimiento del cultivo en estado de inundación y sequía. En esta investigación se presenta el uso de la temperatura de la superficie tomada con termómetros y sensores infrarrojos para detectar el estrés hídrico del cultivo de berenjena, esta se presentó en un enfoque empírico para cuantificar el estrés mediante la determinación del no estrés hídrico en líneas base para los cultivos, en esta se encontró que la relación es lineal entre la cantidad de riego con respecto al rendimiento de la planta y el CWSI para cada método de riego (Bozkurt Çolak, Yazar, Çolak, & Akça, 2015).

En la búsqueda del cambio en el comportamiento de los cultivos con relación al cálculo del índice del estrés hídrico en la investigación trazada por Shadman (2017) se encuentra el planteamiento de la importancia de estimar el estrés hídrico y la programación adecuada del riego en función de la respuesta de los cultivos al estrés hídrico en las diferentes etapas del crecimiento de la planta, sin embargo, se trata a partir de detección remota puesto que se brindan herramientas poderosas para evaluar las características de la vegetación, lo que facilitaría las decisiones de manejo y riego. La programación del riego se puede dar a partir de datos de sensores remotos que se puede potencializar en función de la estimación de la temperatura del dosel, como indicador del contenido de agua del suelo. En esta investigación se concluye que la literatura muestra que el uso del CWSI calculado basado en datos de sensores remotos podría ser el mejor método operativo para monitorear y evaluar el estrés hídrico y la programación del riego de los cultivos (Shadman, Saeid , & Harm, 2017).

Con el propósito de optimizar los sistemas de consumo hídrico y expandiendo las investigación con respecto al umbral permisivo del CWSI en cultivos, para una zona que desarrollo cultivos en espacios áridos Capraro F (2019) propone una investigación enfocada a las herramientas que permiten consistir un análisis efectivo hacia los riesgos que puede presentar un cultivo de tomate monitoreándolos desde la parte de la termometría en imágenes calculando así la temperatura en cada individuo de planta y conllevando al cálculo de un indicador sensible y permitió en donde se encontraría el rango para que estas plantas se categoricen con estrés hídrico y en base a este se

pueda determinar un sistema de riego que permita el aprovechamiento efectivo de este recurso, en comparación con los anteriores este determina los escenarios en el cultivo en donde se dispone un sistema en diferentes porcentajes de distribución hídrica en un determinado período de tiempo hacia la cosecha, resultando con un valor entre 4° C como la temperatura moderada de estrés y 7°C como un estrés hídrico severo (Capraro, Tosetti, & Gimenez, 2019).

La ampliación del tema referente al índice de estrés hídrico CWSI según Lopez R (2009) en su investigación nos concede una idea más compleja y regional sobre la utilización de la termografía infrarroja siendo esta una herramienta que no altera tanto las propiedades físicas como químicas en el cultivo y a su vez nos concede un valor muy acertado sobre la temperatura diferencial en el dosel, y en esto paralelamente les da una percepción en donde esta técnica permite mantener la estructura del cultivo y calcular efectivamente el índice de estrés hídrico del mismo expresando este como “una función lineal de la temperatura diferencial” con respecto a los cambios atmosféricos por la meteorología, sumado a esto, la elaboración de un sistema de riego que pretenda dar una regulación del recurso hídrico adecuadamente sin perjudicar la productividad de los cultivos, en los diferentes cultivos donde se da la revisión de los umbrales de CWSI permisivos antes del riego en las cosechas como lo son la soya, trigo, tomate y maíz entre otros (López López, Arteaga Ramírez, & Vázquez Peña, 2009).

3.2.2. **Imágenes Térmicas:** *Estimación del CWSI a partir de imágenes térmicas*

Las imágenes térmicas funcionan con tecnología infrarroja, lo que hace posible medir la cantidad de calor que emite un objeto o persona y así formar la imagen, estas simulaciones de color son creadas por la cámara y mostradas en la pantalla con diferentes colores de acuerdo con su temperatura, lo más caliente se verá en blanco, lo frío en colores más oscuros como el azul, amarillo y rojo (Mendoza & Rodríguez, 2001). En un estudio de Pérez, C, se exploró el potencial del uso de tecnologías avanzadas para el uso eficiente del agua. Utilizaron imágenes térmicas de una cámara montada en un dron para evaluar el índice de estrés hídrico de la hoja, CWSI. La investigación dedujo que es factible medir el CWSI e inferir la humedad del suelo a partir de las temperaturas de las hojas capturadas en imágenes térmicas tomadas por un UAV (Perez Cubas, 2020).

En un estudio de Durán, M, se examinó el impacto del aumento de la evapotranspiración debido al calentamiento global en cultivos intensivos en agua como el arroz. La investigación se hizo uso de imágenes térmicas a través de sensores remotos para evaluar el CWSI en hojas. Estas imágenes infrarrojas ayudaron a determinar la temperatura de la hoja que, después de la calibración con datos de termopar, se utilizó para analizar la conexión entre CWSI y la humedad del suelo. El método ayuda a supervisar áreas de cultivo expansivas para ajustar el riego y minimizar el uso de agua (Durán Gómez, 2021).

3.3. Marco teórico

3.3.1. Ciclo de producción del Cultivo de Papa

Las papas pertenecen al género *Solanum*, con variedades populares en el país como la sabanera, la pastusa morena, la pastusa suprema y la papa criolla, conocida localmente como yema de huevo, entre otras. El cultivo de papa es un importante motor económico en la nación. En 2012, de las 536.124 ha destinadas a cultivos de corta duración, unas 101.681 ha se dedicaron a la cosecha de papa. (DANE, 2013). El proceso productivo se puede describir en diferentes etapas, la primera de ellas es la selección y clasificación de la semilla, luego el establecimiento del cultivo, seguido por el desarrollo del cultivo, la sanidad del cultivo y por último la cosecha y postcosecha (DANE, 2013).

3.3.2. Ciclo Fenológico del Cultivo de Papa

El viaje de crecimiento de la papa consta de cinco etapas clave, comenzando con la brotación o emergencia y culminando en la fase de cosecha. La duración de este ciclo depende de la variedad de papa específica que se esté examinando y también está influenciada por las condiciones climáticas en las regiones de cultivo. (Vingola, Walter, & Morales, 2017).

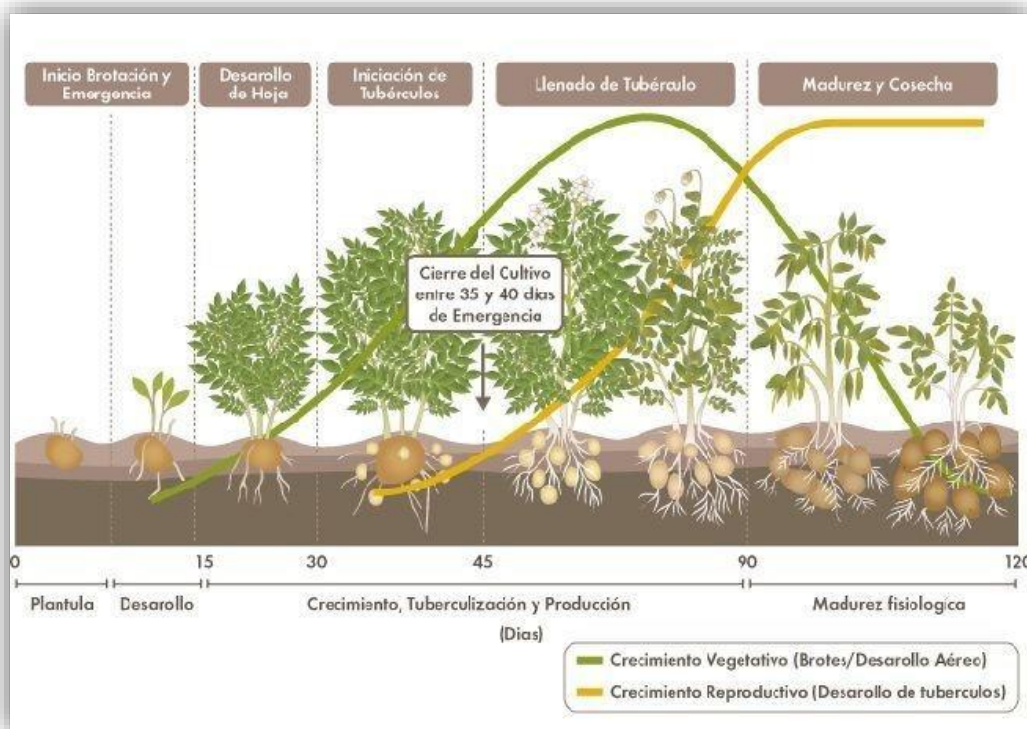


Ilustración 2 Ciclo Fenológico del cultivo de papa

Fuente: (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015)

- **Emergencia o Brotación:** Esta etapa está influenciada por factores ambientales y climáticos, especialmente las condiciones del suelo y la disponibilidad de agua. La variedad de patata y su genética también juegan un papel. El proceso comienza con la preparación del suelo y la siembra de semillas. Gradualmente, las raíces emergen, dando lugar al crecimiento de tallos y hojas. (Sandaña & Martínez, 2018).
- **Crecimientos de Brotes Laterales:** en esta fase se origina el crecimiento aéreo de la planta en el que va adquiriendo firmeza, esta comienza con la formación de la plántula donde se comienza con el proceso de la fotosíntesis, a su vez, se forma en la parte subterránea la expansión de estolones (Vingola, Walter, & Morales, 2017).
- **Iniciación de Tubérculos:** en esta fase en la parte subterránea de la planta se van formando los tubérculos que comienzan su desarrollo en la punta de los estolones en un periodo de 30 a 60 días dependiendo directamente de las condiciones del entorno (Sandaña & Martínez, 2018).

- **Llenado de Tubérculos:** en esta fase se produce la floración del cultivo, evidenciando así la variedad del cultivo con la diversidad de tonalidades de las flores, que pueden ser rojas, blancas, rosadas, purpuras o azules; en esta etapa se comienza a expandir el tubérculo por la acumulación de agua, es en este momento donde los tubérculos absorben la mayor cantidad de nutrientes y carbohidratos disponibles en la planta (Sandaña & Martínez, 2018).
- **Fase de Maduración:** esta es la etapa final del ciclo del cultivo, el crecimiento y la tasa fotosintética de la planta se va reduciendo, llegando a su periodo de envejecimiento, por lo tanto, se empieza a marchitar por completo, dando, así como resultado la maduración del tubérculo (Vingola, Walter, & Morales, 2017).

3.3.3. Cambio climático y la relación con los cultivos de papa

El cambio climático afecta de diferentes formas a los cultivos, es importante reconocer que aquellos cambios, como las variaciones en temperatura y precipitaciones, tienen efectos dispares en la producción de alimentos y en la silvicultura (WE, PK, P, & KM, 2007). Las fluctuaciones climáticas pueden poner en peligro la seguridad alimentaria, pero la agricultura contribuye significativamente al cambio climático a través de las emisiones de CO₂, la deforestación para aumentar el espacio de cultivo y la utilización de fertilizantes y pesticidas. (FAO , 2011), es por esto por lo que se debe optar por introducir en estos sistemas de producción energías renovables. Se entiende por agricultura a la actividad del hombre para la obtención de alimentos vegetales, actividad que emplea actualmente diferentes técnicas y prácticas con el fin de no contaminar el hábitat donde se lleva a cabo el labriego (Condiza, 2018).

La temperatura afecta significativamente el desarrollo de los cultivos, influyendo no solo en las tasas de germinación y crecimiento, sino también en el rendimiento y la calidad del producto. Las heladas son factores que ocasionan pérdidas importantes en el sector agrícola, siendo la ocurrencia de temperaturas catalogadas de hasta 0°C y las heladas en temperaturas por debajo de 0°C, temperatura a la cual, en este caso, los tejidos del tubérculo comienzan a sufrir daño (Gomez & Triana, 2012). Como se ha mencionado anteriormente, las heladas afectan directamente a cultivos susceptibles por las variantes en la temperatura, en este caso en particular se pone en consideración el cultivo de papa como especie *Solanum Tuberosum*, por ser una especie susceptible a

temperaturas inferiores a -25°C , causando daños visibles a nivel foliar y afectando así mismo el rendimiento de calidad del tubérculo (Estacio Rodriguez, 2018). Sin embargo, existen gran variedad del tubérculo, donde el comportamiento con respecto al clima se puede diferenciar entre una especie y la otra, como un ejemplo se tiene que el cultivo de papa comúnmente llamada papa parda - pastusa puede estar a no más de -18°C , a diferencia de otras especies que pueden exponerse a temperaturas más bajas (O. Sepúlveda Delgado, 2015). Por lo tanto, se plantea esta investigación para poder contribuir de manera significativa a la detección del índice de estrés hídrico en el cultivo de papa a través de imágenes térmicas, esto con el fin de incentivar el uso responsable de los recursos naturales en especial el uso eficiente del agua.

3.3.4. Índice de Estrés Hídrico

El modelo piloto calcula el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) utilizando balances de energía. Estos balances consideran la tasa de transpiración del cultivo determinando la temperatura del dosel y el déficit de presión de vapor. El dosel del cultivo, influenciado por la disposición espacial de las hojas, recoge la radiación y facilita el intercambio de vapor de agua y dióxido de carbono. La estructura del dosel afecta factores como la temperatura y la concentración de vapor, lo que afecta procesos como la fotosíntesis y el crecimiento. Además, el posicionamiento y la distribución de las hojas juegan un papel en la interceptación de la radiación. (López López, Arteaga Ramírez, & Vázquez Peña, 2009).

Formularon una técnica práctica para medir la humedad atmosférica de las plantas. Este método se basa en el establecimiento de líneas de base sin estrés hídrico que rastrean las variaciones de temperatura en la planta en función de las condiciones ambientales.

$$CWSI = \frac{[(T_c - T_a)_m - (T_c - T_a)_{li}]}{[(T_c - T_a)_{ls} - (T_c - T_a)_{li}]}$$

Ecuación 1: CWSI Según Idso y Jackson (1981)

Fuente: (López López, Arteaga Ramírez, & Vázquez Peña, 2009)

T_c= Temperatura del follaje

T_a= Temperatura ambiente

M= Variable de diferencia entre temperaturas (*T_c* y *T_a*)

Li= Variable de diferencia entre temperaturas durante la evapotranspiración no se encuentra restringida por el agua en disposición

Ls= Variable de diferencia entre temperaturas durante la evapotranspiración es igual a 0, por el agua en disposición

3.4. Marco conceptual

- **Desarrollo Sostenible:** La idea del Desarrollo Sostenible surgió del informe Brundtland de 1987 titulado "Nuestro Futuro Común". Gira en torno a satisfacer las necesidades de la generación actual sin poner en peligro los recursos para las generaciones futuras. (Aragones, 2003).
- **Estrés Hídrico:** Cuando la demanda de agua supera la oferta, se produce una deficiencia que afecta negativamente a los agricultores. Esta escasez disminuye el rendimiento y la calidad de los cultivos debido a factores como la transpiración excesiva de las plantas, las bajas temperaturas y la elevada salinidad del suelo (Moreno, 2009).
- **Evapotranspiración** es el proceso definido como la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación, por lo tanto, la evapotranspiración en un cultivo se entiende como el proceso en el cual la evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos procesos, puesto que, la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo (FAO, 2020).
- **Fenología:** Este campo de la ciencia examina eventos biológicos, incluidos los ciclos de vida de plantas e insectos anuales, cambios en el desarrollo de árboles y arbustos, migraciones de aves y otros fenómenos que ocurren periódicamente alineados con patrones estacionales. Estos eventos están influenciados por el clima local y los patrones climáticos anuales (Casiano Dominguez, 2018).

- **Fotogrametría:** Bonneval define la fotogrametría como el método utilizado para determinar la forma, el tamaño y la posición espacial de los objetos principalmente analizando las medidas de una o más fotografías (Quirós Rosado, 2014), La Sociedad Estadounidense de Fotogrametría y Detección Remota describe la fotogrametría como la combinación de arte, ciencia y tecnología utilizada para recopilar datos confiables sobre entidades físicas y su entorno mediante el procesamiento, la medición y el análisis de imágenes y patrones electromagnéticos. Sin embargo, en lugar de interpretar fenómenos, la fotogrametría utiliza mediciones fotográficas para producir planos y mapas precisos. (Sergio Arriola, Amit Ferencz, & Renato Rimolo, 2018).
- **Imágenes térmicas** miden la intensidad de la energía térmica que proviene de la superficie de un objeto, sin embargo, cabe aclarar que no se trata de un valor de la temperatura específico, así mismo, las imágenes térmicas, guardadas digitalmente, pueden procesarse utilizando varias herramientas de software y compararse con una referencia térmica. Estas imágenes permiten la detección remota de la temperatura de un objeto u ofrecen datos detallados de temperatura en relación con su entorno. (Salvador & Cibrián, 2013).
- **Índice del Estrés Hídrico:** Gira en torno a la evaluación de la tasa de transpiración actual de un cultivo midiendo la temperatura del dosel y el déficit de presión de vapor. r (López López, Arteaga Ramírez, & Vázquez Peña, 2009).
- **Levantamiento Topográfico,** se le conoce como levantamiento topográfico a la agrupación del trabajo de campo implica la recopilación de datos esenciales para determinar las coordenadas de puntos específicos en el terreno examinado, lo que permite la creación de un plan de área (Pachas, 2009), un levantamiento topográfico señala con precisión las características importantes del terreno y a su vez componentes naturales e infraestructuras llevadas a cabo por el hombre (Burbano Vistin, 2015).
- **Ortomosaico** es un mosaico es la colección de imágenes capturadas por cámaras, lo cual hace posible realizar traslapes para unir y combinar las imágenes en una sola, en el momento en que estas imágenes son corregidas por distorsiones que se presentan por relieves y elementos que interfieren con estas, se le determina ortomosaicos por su correjimiento geométrico y se realiza un balance de color para obtener un mosaico continuo (Galeana-Pérez, 2023).

3.5. Marco legal

Dentro de este marco legal se encuentra la norma vigente que se aplica al objetivo del presente trabajo enfocado en la agricultura sostenible y el uso de aeronaves no tripuladas

- **Ley 1286 de 2009:** Su objetivo es fortalecer el marco nacional de ciencia y tecnología, permitiendo a Colciencias implementar un modelo productivo arraigado en la ciencia, la tecnología y la innovación. (El Congreso De Colombia, 2009).
- **Ley 1876 de 2017:** Esta legislación tiene como objetivo iniciar el Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria (SNIA), introduciendo nuevos roles, capacidades y métodos de coordinación para establecer un servicio público de extensión agrícola. (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2017).
- **Ley 1731 de 2014:** Esta tiene como objetivo adaptar medidas en función del financiamiento, con el fin de proyectar la reactivación del sector agropecuario pesquero, acuícola, forestal y agroindustria (Función Pública, 2014)
- **Ley 373 de 1997:** Esta presenta las licencias necesarias para cualquier tipo de proyecto que requiera del consumo de agua u otros recursos naturales, en esta se relaciona directamente a los requerimientos que se necesiten para el otorgamiento de permisos en fuentes de abastecimiento (Función Pública, 1997)
- **Decreto 1076 de 2015:** Este decreto establece el Marco Normativo Unificado para el Sector Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Tiene por objeto orientar y regular la planificación ambiental territorial y establecer las políticas relativas a la conservación, protección, ordenamiento y aprovechamiento de los recursos naturales renovables y del medio ambiente del país. Esto se hace para asegurar un progreso sostenible, considerando los roles asignados a otros sectores. (Función Pública, 2015).
- **Ley 187 de 2006:** Esto tiene como objetivo garantizar el derecho de todos los ciudadanos a un medio ambiente saludable mientras promueve la salvaguarda, conservación y protección de los recursos renovables y no renovables, basados en el crecimiento sostenible (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2006)

- **Resolución 04201 de 2018:** tiene como finalidad ampliar la información sobre las instrucciones del cumplimiento de los requerimientos de aeronavegabilidad y poder permitir la realización de los vuelos de UAS, ya que estos se establecen en los 13 reglamentos aeronáuticos de Colombia (RAC 91) (Ministerio de Transporte, 2018).

4. IMPACTO AMBIENTAL O PERTINENCIA SOCIAL

En el desarrollo del proyecto se presentará un impacto desde dos frentes, desde la investigación y la educación, donde se plantea implementar nuevas tecnologías para incentivar la investigación con el propósito generar una agricultura sostenible e inteligente en Boyacá con el incentivar el uso de los recursos naturales de manera responsable para así contribuir a nivel ambiental y social. Con el fin de suministrar información sobre estrategias eficientes para que la agricultura sea más sostenible y sustentable en términos económicos y de rentabilidad para cumplir con algunos objetivos del desarrollo sostenible como lo son (hambre cero y producción y consumo responsable), permitiendo emplear soluciones que incentiven el desarrollo en la región con productos agrícolas como los que ha caracterizado a Boyacá, en este caso en específico la papa (*solanum tuberosum*).

Evaluable el campo la educación ambiental se pretende formular una estrategia para el aprovechamiento del recurso hídrico partiendo como problemática y referente la presencia del estrés hídrico en cultivos donde se ve directamente afectados la productividad y desarrollo de este tipo de sistemas que se han implementado en estas actividades agrícolas. Contemplando como solución el uso eficiente del agua se busca conformar estratégicamente una metodología capaz de asociar aspectos técnicos que permita capacitar e incentivar a los agricultores a tecnificar sus cultivos y crear una concientización y responsabilidad del uso eficiente del recurso hídrico.

5. PRESUPUESTO

Recursos Disponibles

Tabla 1: Presupuesto del proyecto

Materiales	Computadores, Delimitadores, Software, Pix4d, ArcGIS, Cropwat
Recursos Institucionales	Licencia académica de ArcGIS, Dron (Parrot Anafi Thermal), Sensor de Temperatura.
	Biblioteca CRAI Usta Tunja
Financiamiento	Recursos Propios

Fuente: Autor (es)

6. METODOLOGIA

Población afectada

Establecido para tipo de áreas con potencial para ser cultivables, especialmente en terrenos cultivados de papa, en la zona geográfica de Motavita, Boyacá.

Muestra

La investigación se basa en la recolección de datos de temperatura del cultivo por medio de imágenes térmicas e imágenes RGB obtenidas por DRON, en un área de 0,75 Hec, en una siembra de papá (*solanum tuberosum*) ubicado en Motavita, Boyacá.

Variables

Contemplando las diferentes variables, se encuentran como la temperatura ambiente y temperatura del cultivo de papa.

Diseño metodológico

En el desarrollo de este tipo de escenario para la obtención de la investigación se realiza la ruta metodológica que permita dar cumplimiento de todos los objetivos previstos, generando así un el diagrama metodológico *Ilustración 3*, dónde se observan las 3 distintas etapas para la obtención de los datos necesarios iniciales de los cuales permiten la creación de los mapas de CWSI, el análisis que relaciona el ciclo fenológico y la formulación de la estrategia para el manejo eficiente del recurso hídrico enfocado en los valores del índice de estrés hídrico (CWSI) en la zona de investigación.

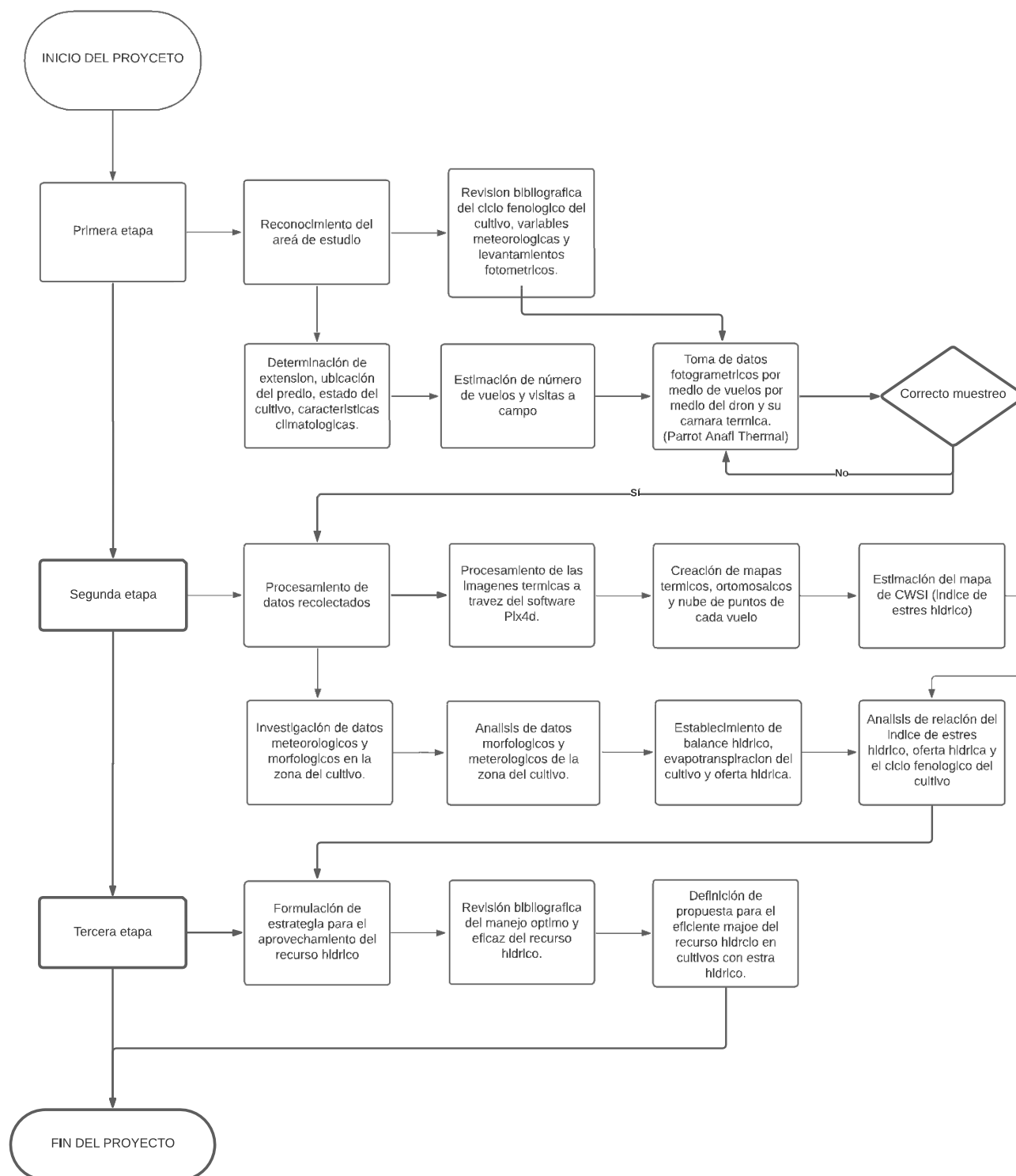


Ilustración 3: Diagrama Metodológico

Fuente: Autor (es)

6.1. Primera Etapa (1)

6.1.1. Reconocimiento del área de estudio

Como comienzo al trabajo de investigación es necesario realizar una revisión de los documentos oficiales expedidos por la alcaldía de dicho municipio, entidades ambientales como IDEAM y la Corporación Regional de Boyacá, entre otras; con el fin de delimitar el área de estudio en cuestión identificando las variables climatológicas presentes como lo son temperatura, precipitación y humedad con fines de estimar la disponibilidad del recurso hídrico y el índice de estrés hídrico (CWSI).

6.1.2. Revisión bibliográfica del ciclo fenológico de la papa

Para realizar la debida comparación entre el desarrollo del ciclo fisiológico y las consecuencias en el deterioro que puede sufrir el cultivo por incidir en un estrés hídrico a lo largo de su crecimiento, se conlleva a una revisión bibliográfica para determinar la duración del desarrollo crecimiento y gestación del cultivo de papa a su vez con los parámetros requeridos en la zona de producción.

Teniendo en cuenta dichos datos se estima que la producción de este cultivo de papa tiene como longevidad alrededor de 140 días por lo cual es pertinente hacer un muestreo quincenal, que permita caracterizar su fase de crecimiento, tuberculización y producción antes de su etapa de madurez fisiológica. (Corporación, 2000)

6.1.3. Recolección de datos climatológicos y tratamiento de datos

En la obtención de los datos climatológicos, se define desde zona de estudio las estaciones climatológicas circundantes con base a su categoría y las variables que estás estudian, para esto se consulta en la página de datos abiertos del IDEAM los datos hidro meteorológicos filtrando la información por estaciones en actividad aún vigente, tipo de variable a consultar, cercanía con el área de estudio y tiempo de toma de datos.

Los datos obtenidos son procesados en el programa ArcGIS para determinar qué estaciones tienen los parámetros requeridos para la recolección de estos datos y un estado de actividad, como se

muestra (*ilustración 4*), y a su vez la cercanía que corroborará el análisis del estrés hídrico en el cultivo junto con la evapotranspiración de las plantas.

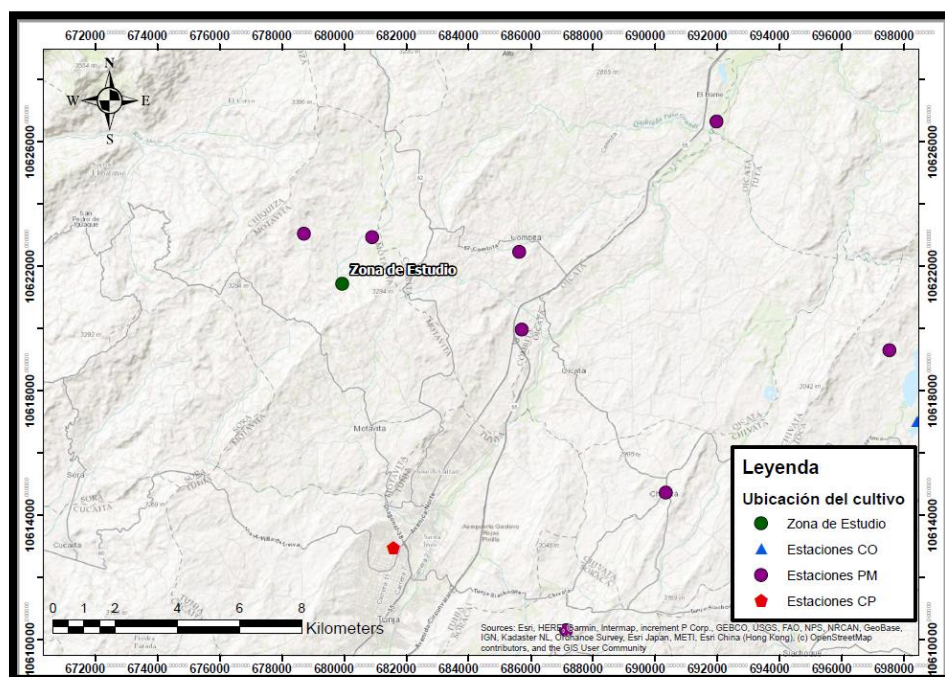


Ilustración 4: Distribución de estaciones meteorológicas

Fuente: Autor (es) (IDEAM)

6.1.4. Recolección de datos fotogramétricos

De acuerdo con el estudio del ciclo fenológico de la papa, se determinó que durante el tiempo de desarrollo del dosel (30 a 90 días), se realizaría la intervención para la toma de datos por medio de 3 visitas con un intervalo entre cada uno de 15 días. En estos espacios por medio de la toma de fotos térmica y RGB a través del dron Parrot Anafi Thermal se recolecta la información de temperatura del cultivo de papa en el dosel.

6.1.5. Parámetros de vuelo

Se define un plan de vuelos para la recolección de datos durante el estudio en campo con el fin optimizar los tiempos y avalar la calidad de la información recolectada, esto a través de la app Pix4dcapture como se observa en la *ilustración 5*. Durante la planeación se debe seleccionar el recorrido a ejecutar por el Dron, la velocidad del viento y la presencia de posibles obstáculos por lo tanto es necesario establecer una altura superior a 50 más.

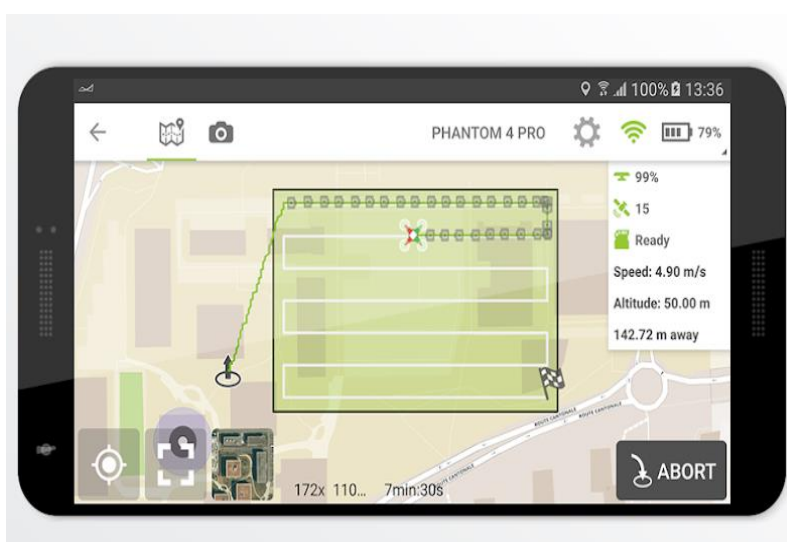


Ilustración 5 Ejemplo de planeación de ruta en Pix4dcapture

Fuente: Pix4dcapture

6.2. Segunda etapa (2)

6.2.1. Procesamiento de datos obtenido en la toma de imágenes fototérmicas.

Se consolida la información obtenida durante los vuelos, se carga en el software Pix4Dmapper (Licencia de prueba), donde por medio del procesamiento de los datos se llega a la creación de un modelo de elevación topográfica, la generación de nube de puntos y orto mosaico, que permite

obtener como resultado los índices térmicos y el mapa de índices de estrés hídrico, se tuvieron en cuenta lo siguientes aspectos durante el procesamiento:

- Definir puntos claves a partir de la escala de la imagen
- Clasificación y densificación de la nube de puntos (Corrección de puntos de control para una malla de texturas y creación el DSM, que permita un posterior análisis de los resultados)
- Generación de Ortomosaicos en base a las imágenes captadas (El modelo superficie digital DSM permite el cálculo mapas de reflectancia y ortomosaicos.)
- Estimación de índices en el cultivo en relación con los mapas de reflectancia.

6.2.2. Estimación del índice estrés hídrico (CWSI)

En la estimación del CWSI es necesario aplicar la ecuación anteriormente mencionada de tal forma que genere una interacción entre los píxeles de la cámara térmica con respecto a la temperatura ambiente. Para la temperatura del cultivo se realizan los sobrevuelos con la cámara térmica especificando en cada fotografía una variable de calor, mientras tanto para la temperatura ambiente se toman los datos requeridos por medio de un sensor térmico en un tiempo determinado siendo este previamente seleccionado entre las 12:00 pm y 2:00 pm, siendo esto los momentos de mayor brillo solar y elevación de la temperatura.

El software Pix4Dmapper realiza la estimación de la temperatura en cada un punto generado por la nube de punto y el ortomosaicos, posteriormente con esta información se aplica la fórmula del CWSI, pertinente al programa, determinados por la siguiente ecuación.

$$Cwsi = \frac{T_a}{(2T_a - T_c + Fc)}$$

Ecuación 2: Fórmula de CWSI aplicada al software Pix4D

Tc= Temperatura del cultivo en el follaje

Ta= Temperatura ambiente

Fc= Factor de corrección

Cabe resaltar que dicho factor de corrección es de 7°C dado que se relaciona este valor a los cultivos respectivamente de papa. (Rud, 2014)

6.2.3. Análisis del estrés hídrico a lo largo del ciclo fenológico en el cultivo

Al estudiar las diferentes fuentes bibliográficas relacionadas con ciclo fenológico en el cultivo de papa, se identifica es esencial importancia durante la etapa de crecimiento la presencia de recurso hídrico para el desarrollo del cultivo, siendo así que cómo se menciona en (Corporación, 2000), las partes más importantes en el crecimiento rápido de la planta se ve demuestra en la disponibilidad de agua que esta puede tener en el suelo dado que esto permite un mayor engrosamiento en el tubérculo permitiendo así mayor absorción de nutrientes.

Para fines de esta investigación y en relación con la información anteriormente expuesta, se define realizar el estudio del cultivo durante su etapa de crecimiento que corresponde entre los 30 a 90 días, durante esta etapa de ciclo la papa pasa por los procesos de crecimiento vegetativo, desarrollo de tubérculos y llenado de los mismos que paralelamente este asociado con la disponibilidad de agua que se encuentra en el área, por lo tanto con el fin de determinar el recurso hídrico existente para el cultivo se realizó un Balance Hídrico con el cual se pretende conocer la cantidad de agua con la cual cuenta el agricultor para el riego del cultivo, siendo este la oferta hídrica y poder entender la causas de CWSI.

6.2.4. Balance hídrico

El estudio del balance hídrico es un sistema aplicativo que permite estimar los volúmenes de agua que se dan sobre un periodo de tiempo generalizando sí 2 principales componentes, una salida y una entrada. Dicho estudio se realiza de acuerdo con la ecuación de continuidad permitiendo así estimar la cantidad de agua almacenada por escurrimiento (Sokolov & Chapman, 1981), a su vez

contemplando tanto las aguas superficiales y subterráneas, como las precipitaciones en la zona de estudio.

De acuerdo con lo anterior se debe plantear la creación de un balance hidrológico que nos permita establecer la cantidad de agua por escurrimiento de la cual puede contar la zona del cultivo tomando como datos referencia los periodos de precipitación de los últimos años, el número de curva procedente al tipo del suelo, a su vez de los datos de temperatura en las estaciones climáticas más cercanas para el cálculo de la evapotranspiración en la zona observa. Teniendo esto en consideración propone el Sistema de Curve Number de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola se aplicó el método de Soil Conservation Service (SCS) este es un método aplicable a pequeñas cuencas agrícolas, pues previamente se hace la estimación de la retención máxima potencial de agua del suelo y la precipitación, permite de una u otra manera estimar el escurrimiento de la cuenca como un sistema (Chow, 1994),

El método de SCS conocido principalmente como el número de curva de escorrentía (CN), que se desarrolló para calcular la escurrimiento en el suelo después de una tormenta, el número de curva depende de las propiedades como lo es el tipo de suelo hidrológico que permitan dar dicha escorrentía, el uso determinado del suelo, las condiciones en la superficie del suelo y la humedad que posee el suelo (Turrent, y otros, 2010); en el *anexo 17* se encuentra dicha tabla dando como resultado un CN igual a 75.

Ecuación 3. Precipitación Efectiva

$$Pe = \frac{(P - 0,2 * S)^2}{P + 0,8 * S}$$

Donde:

- PE representa la precipitación efectiva de la cuenca.
- P representa la precipitación diaria de la cuenca.
- S representa retención potencial de la cuenca.

Ecuación 4. Retención Potencial Máxima

$$S = \frac{100}{CN} - 100$$

- CN representa el número de curva de la cuenca.

Ecuación 5: Curve Number en condiciones de humedad antecedente seca

$$CNI = \frac{CNII}{2,3 - 0,013 * CNII}$$

- CNI representa el número de curva de la cuenca en condición de humedad antecedente seca.

Ecuación 6. Curve Number en condiciones de humedad antecedente promedio

$$CN_{II} = \frac{CN1 * A1 + CN2 * A2 ... CNn * An}{\text{Área total}}$$

- CNII representa el número de curva de la cuenca en condición de humedad antecedente normal.

Ecuación 7. Curve Number en condiciones de humedad antecedente húmeda

$$CNII = \frac{CNII}{0,43 - 0,0057 * CNII}$$

- CNIII representa el número de curva de la cuenca en condición de humedad antecedente húmeda.

Por otro lado, la infiltración se determinó comparando la precipitación de la subcuenca con la precipitación efectiva, para este cálculo se estimó mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 8. Infiltración de la cuenca

$$I = P - Pe$$

- I representa la infiltración de la cuenca.
- Pe representa la precipitación efectiva diaria de la cuenca.
- P representa la precipitación diaria de la cuenca.
-

Ecuación 9. Evapotranspiración

$$E = \left(\frac{10 * t}{I} \right)^{\alpha} * 1,6$$

- E representa la evapotranspiración de la cuenca.
- t representa la temperatura media mensual.
- I representa el índice de calor anual.

También se debe tener en cuenta el parámetro de percolación ya que esta es la variable que se determina la escorrentía subterránea que este en la subcuenca. Esta variable se calculó mediante la siguiente formula:

Ecuación 10. Percolación

$$Rg = I - \Delta RHS - ETP$$

- Rg representa la percolación diaria que se presenta en la cuenca.
- I representa la infiltración diaria de la cuenca.
- ΔRHS representa la reserva de humedad neta que presenta el suelo en la cuenca durante el día de estudio.
- ETP representa la evapotranspiración diaria de la cuenca.

Como paso último del balance hidrológico se calcula la escorrentía total que está comprendida mediante las siguientes ecuaciones:

Ecuación 11. Escorrentía subterránea

$$Es = Es_{i-1} * 0,99 + Rg * (1 - 0,99)$$

- Es la escorrentía subterránea diaria de la cuenca.
- Rg representa percolación diaria de la cuenca.
- Es_{i-1} representa la escorrentía subterránea de la cuenca del día anterior al analizado.

Ecuación 12. Escorrentía total de la cuenca

$$Et = Pe + Es$$

- Et representa la escorrentía total diaria de la cuenca.
- Pe representa la precipitación efectiva diaria de la cuenca.
- Es la escorrentía subterránea diaria de la cuenca.

Fuente: (Chow, 1994)

6.3. Tercera parte (3)

Para la realización del análisis bibliográfico fue necesario la recolección de información que permitiera evaluar una estrategia óptima en el control, distribución y computo en la eficiencia respectó al recurso hídrico por medio de revistas científicas y bases de datos con información confiable.

7. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1. Reconocimiento del área de estudio

La zona geográfica seleccionado para la investigación cuenta con una temperatura promedio de 14°C perteneciente a un clima frío húmedo, a su vez también se registra un promedio de precipitaciones de 35,7 mm mensual correspondiente a una altura de 3075 msnm. (CMGRD, 2016). Dicho proceso de muestreo se realizó en el transcurso del año 2023, entre el mes de marzo y el mes de junio la cual está ubicada en el municipio de Motavita, Boyacá, Colombia, vereda el Sote, con coordenadas latitud 5.619794° y longitud -73.375406°, de cultivo de papa. Dentro de esta zona se encuentra el cultivo de observación y estudio en un área aproximada de 0,74 hectáreas, de la cual recibe aportaciones hídricas de la precipitación de la zona y un riego no controlado por parte del agricultor resultando así en un desaprovechamiento de ese recurso.

7.2. Procesamiento de datos fotogramétricos

En los cultivos de papa se encuentran diferentes variables que permiten dar una productividad óptima con relación a la zona de siembra, por ende, es necesario determinar los factores importantes en la influencia del óptimo desarrollo en su ciclo fenológico, siendo uno de estos el acceso del recurso hídrico y las cantidades suficientes con un riego homogéneo dentro del área, simultáneamente se deben conocer las etapas importantes en el crecimiento de este cultivo puesto que en las etapas de crecimiento, desarrollo y tuberculización es el estado crítico que conlleva a una buena producción y un efectivo desarrollo de la planta. (Corporación, 2000)

Para analizar dicha insuficiencia de agua en las plantas se realiza el procesamiento de las imágenes fototérmicas recolectadas por dron y programar a través del software Pix4dmapper, obteniendo así 9 proyectos de vuelos en las 3 distintas visitas a campo. Cada proyecto de vuelo se procesó dando como resultado la creación de un ortomosaico, DTM y un mapa índice. En concordancia al área del cultivo se optó por un vuelo a una altura de 50 m facilitando así el tiempo de vuelo y evitando obstáculos en el lugar, (cables de alta tensión). Cada vuelo cuenta con una variación de las imágenes obtenida siendo así cómo se escribe en la siguiente tabla:

Tabla 2: Cantidad de imágenes obtenidas por vuelo

VUELOS	N° de imágenes tomadas
1	290
2	308
3	306
4	310
5	274
6	306
7	316
8	293
9	296

Fuente: Autor (es)

En la programación de las imágenes es importante resaltar la variación que tienen en cuanto al tiempo en procesamiento, que varía según la eficacia de las imágenes, el número de las imágenes, y los componentes de procesamiento del computador en donde se esté realizando.

En los diferentes proyectos de vuelos estudiados en las 3 diferentes visitas se recopila el vuelo que tenga una estricta relación entre el mapa de índice y su ortomosaico distribuyendo así un proyecto de vuelo por cada visita. Los vuelos restantes se encuentran con sus diferentes resultados en los anexos pertinentes.

Ortomosaicos, Mapa de índices y Modelos digitales del terreno

Después del procesamiento de todas las imágenes por los diferentes procesos, se diseñan los modelos digitales del terreno y los mapas de índices comenzando con de la nube de puntos,

mallas 3d y los mapas en reflectancia; cómo se observa en (*ilustración 6*) donde se puede visualizar se generan los puntos claves la aglomeración en la nube puntos:

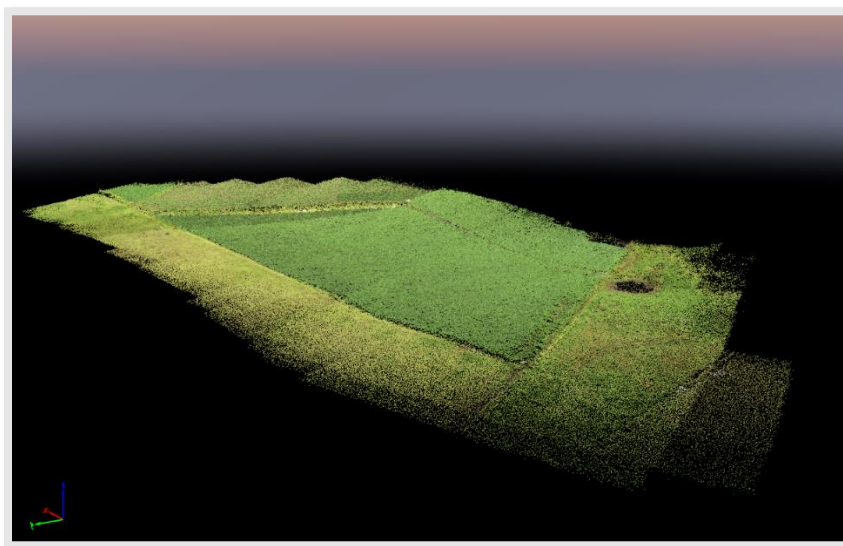


Ilustración 6: Modelo puntos clave

Fuente: Autor (es)

Posteriormente a la creación de los puntos clave, se desarrolla la nube de puntos que permitirán dar forma y textura en un modelo 3d la extensión y la elevación del terreno formada cómo se muestra en la ilustración.

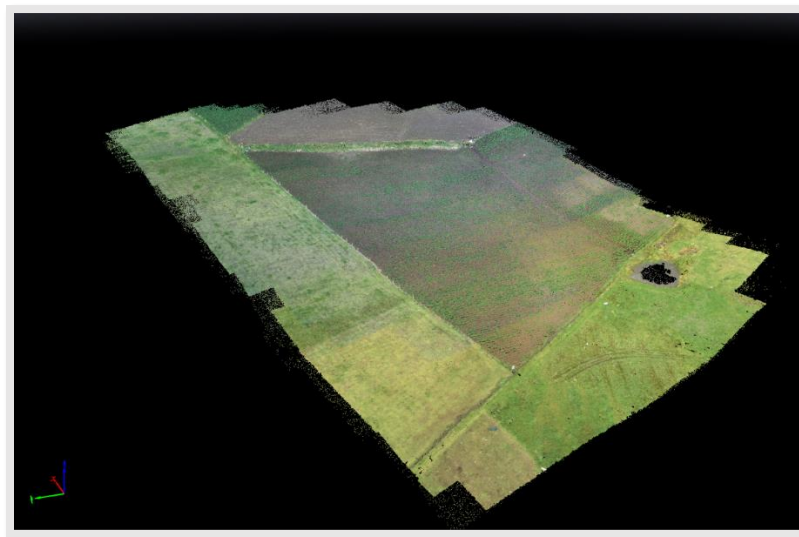


Ilustración 7: Modelo del terreno digital vuelo 4

Fuente: Autor (es)

7.3. Cálculo del índice estrés hídrico (CWSI)

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el procesamiento de las imágenes ya mencionadas se presentan los siguientes resultados y el análisis de cada vuelo representativo en cada una de las visitas realizadas, implementando la fórmula de estrés hídrico para la obtención de dicho mapa, tomando como variables el mapa de índice térmico conjunto a la temperatura ambiente registrada en la zona de estudio. Posteriormente, se presentan los resultados de los mapas obtenidos y el análisis pertinente de cada uno, dando como respuesta el objetivo específico uno, el cálculo y el análisis de los mapas de los índices de estrés hídrico en el cultivo (CWSI).

7.3.1. Observación de Campo 1

La primera visita en la zona de estudio se realizó el día 28 de marzo del 2023 con la toma de los datos del proyecto de vuelo 1, 2 y 3, tomando como vuelo representativo este último por sus delimitaciones dentro de cada área del mapa. Como se puede observar en (*ilustración 8*) se denomina el orto mosaico para el vuelo número 3 pudiendo observar la conjugación y georreferenciación agrupa de las 306 imágenes captadas por el dron, en la parte central se observa

el cultivo de estudio, con un crecimiento vegetal a 60 días de su siembra y a su vez iniciando secciones en donde no hay un crecimiento óptimo o un crecimiento lento de los individuos. A su vez se puede tomar como referencia hacia el lado derecho el año un cultivo en plena etapa de siembra por lo cual está descubierto mientras tanto hacia la parte izquierda del cultivo se evidencia una zona con grandes proporciones cobertura vegetal.

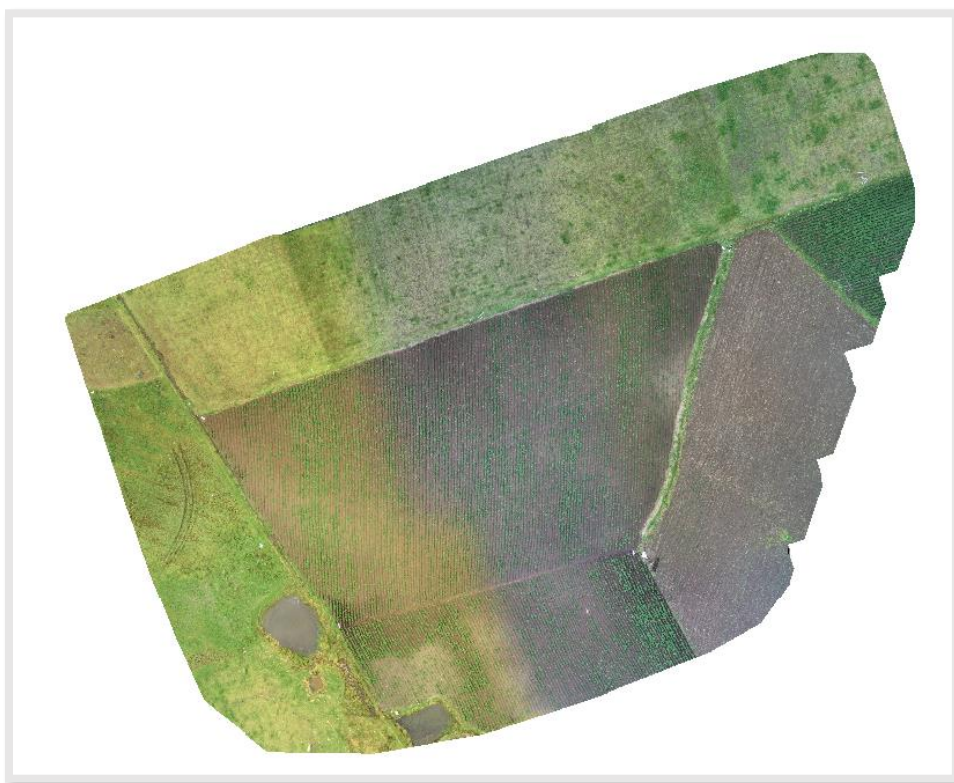


Ilustración 8: Ortomosaico del vuelo número 3

Fuente: Autor (es)

Con respecto a la anterior imagen del ortomosaico, se evidencian grandes relaciones con el mapa del índice estrés hídrico, dando a entender que gran parte del cultivo posee un gran estrés hídrico ya sea por su poca vegetación y la falta de un momento de riego oportuno, estoy referenciado con el indicador de estrés hídrico cercano a 1 (naranja), no obstante se delimitan pequeñas zona del cultivo en donde su CWSI es cercano o igual a 0 (verde) puesto se expone más vegetación y se dan los crecimientos de los brotes en el tiempo establecido.

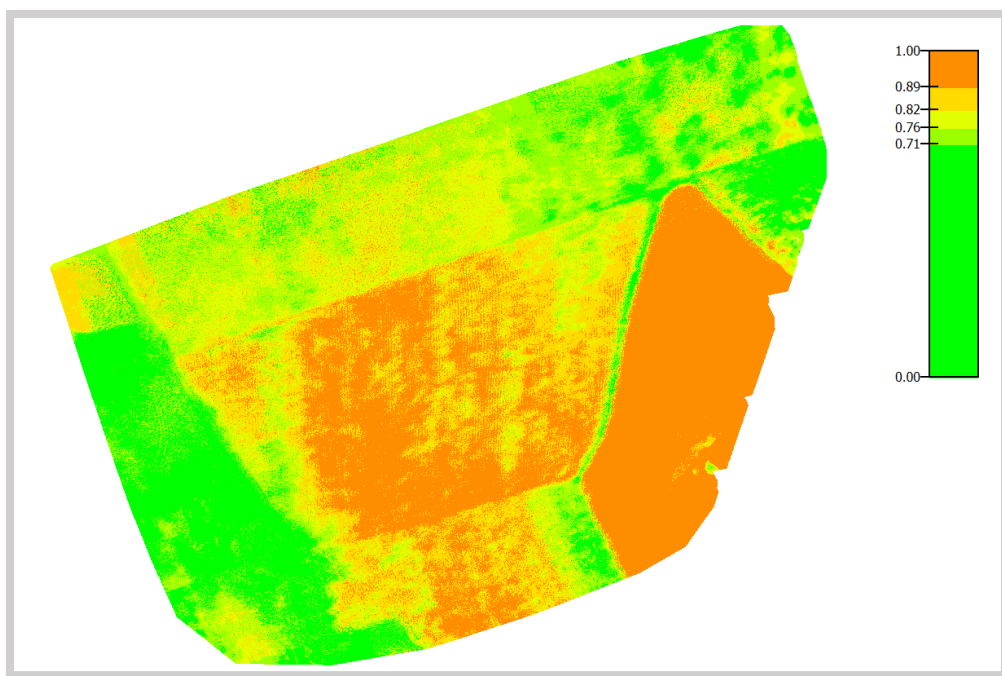


Ilustración 9: Mapa de índice de estrés hídrico vuelo número 3

Fuente: Autor (es)

7.3.2. Observación de Campo 2

Consecuente el anterior vuelo, la segunda visita de la zona estudio se realizó el día 11 de abril del 2023 con la toma de los datos del proyecto de vuelo 4, 5 y 6 tomando como datos representativos el vuelo 4, que permitió consolidar más de 326 fotografías capturadas. En el desarrollo del cultivo frente al ciclo fenológico se entiende la etapa de desarrollo en la zona de estudio para este vuelo en donde se puede observar un crecimiento en el dosel del cultivo frente al vuelo anteriormente observado teniendo un mayor porcentaje de zonas con crecimiento de planta frente a zonas aún inexistente o lento crecimiento de sus individuos.



Ilustración 10: Ortomosaico del vuelo número 4

Fuente: Autor (es)

Posteriormente en el mapa de índice de estrés hídrico se evidencia una correlación con el ortomosaico, evidenciándose un aumento en el crecimiento vegetativo en toda el área del cultivo y alcanzando un menor porcentaje con segmentos que disponen estrés hídrico. A su vez se puede hacer la comparación con el cultivo aledaño a este en donde su crecimiento aún no se evidencia y al contrastar con la temperatura resultante en el ambiente da como resultado la comparativa entre estrés hídrico (Rojo) y la ausencia de éste (Verde), sin embargo, las zonas delimitadas con estrés hídrico son recurrentes al vuelo anterior, es decir que se evidencia el mismo factor de estrés hídrico en los 2 diferentes vuelos tomados.

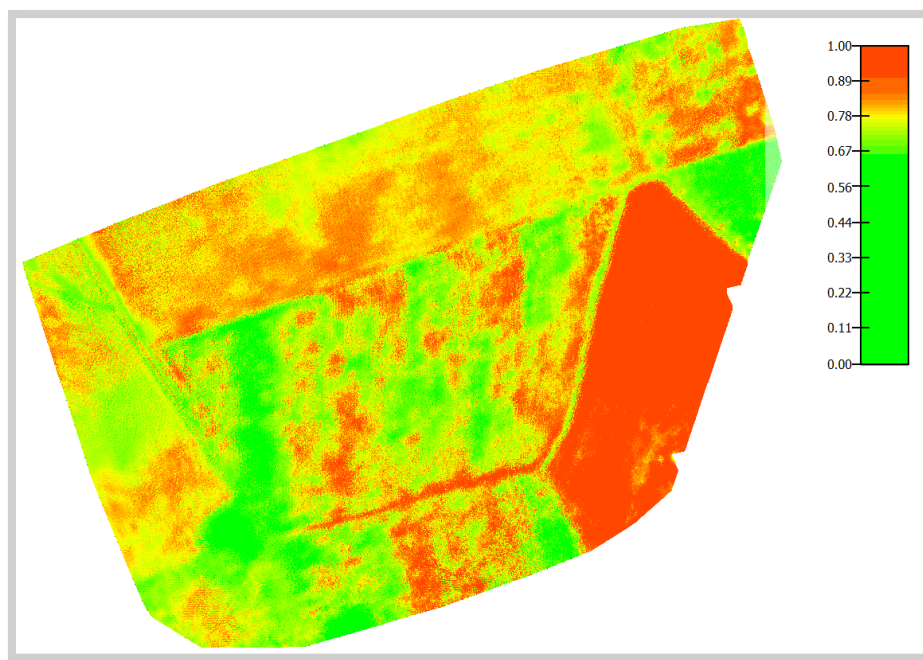


Ilustración 11: Mapa de índice de estrés hídrico vuelo número 4

Fuente: Autor (es)

7.3.3. Observación de Campo 3

Teniendo en cuenta la información visualizada en la (ilustración 12-13), se evidencia el proyecto de vuelo número 7 del cual se da como resultado el cultivo en el último día de su fase del ciclo fenológico de crecimiento y desarrollo, observando un CWSI con menor proporción a las anteriores imágenes, pero validando los problemas de crecimiento que sufre el cultivo al enfrentar dicho fenómeno por la falta del recurso hídrico. Las partes más significativas se encuentran hacia los laterales del cultivo en pequeñas proporciones de color rojo o amarillo indicándola inexistencia de cobertura vegetal o una muy baja proporción de follaje de las plantas. Adicionalmente a esto como se evidencia en el anexo 14 existen partes en donde no existe un crecimiento vegetal y segmentos de menor tamaño con brotes que no alcanzan su crecimiento total, esto observado mediante los automáticos del vuelo.

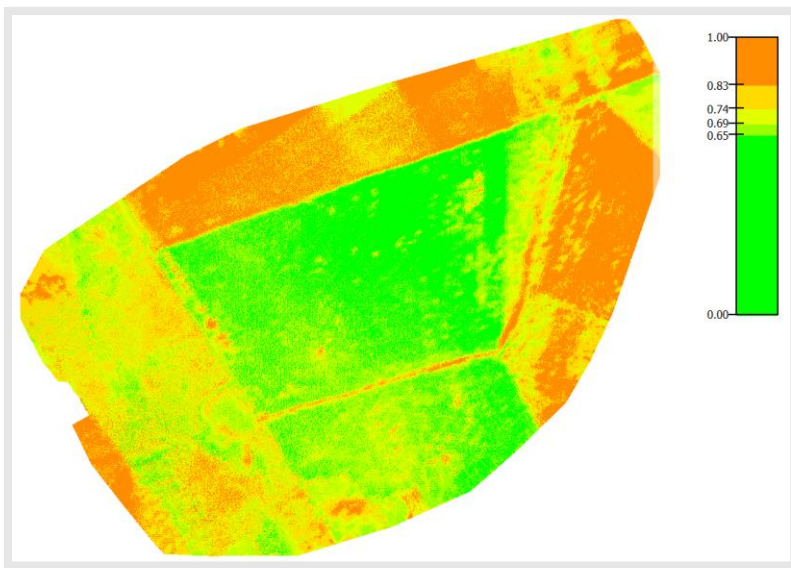


Ilustración 12 Mapa de CWSI Vuelo 7.

Fuente: Autor (es)



Ilustración 13 Ortomosaico vuelo 7

Fuente: Autor (es)

En los 3 diferentes escenarios a lo largo de las 3 visitas de observación a campo de la zona de estudio se evidencia un CWSI moderado en la parte del cultivo que nos permitió afirmar la presencia de este fenómeno en el cultivo en fracciones moderadas así como el desaprovechamiento del recurso hídrico o su mala distribución dentro del área de siembra que impide el crecimiento óptimo de la planta y genera una improductividad tanto en los productos que genera como en el uso de agua suministrado.

7.4. Análisis del estrés hídrico a lo largo del ciclo fenológico en el cultivo

Para poder comprender los factores que pudieron a ver producido este estrés hídrico en el ciclo fenológico del cultivo es necesario estimar la oferta hídrica que se puede generar en dicha zona, siendo de vital importancia la estimación de un posible caudal que permita abastecer al cultivo cómo subes la estimación la tensión del recurso hídrico por las precipitaciones das en el tiempo de observación y de desarrollo del cultivo. Por ende, se forma un estudio de balance y hídrico desde la conservación de masas hacia las precipitaciones en la subcuenca generada desde el punto más cercano al cultivo así los valores de precipitaciones al cultivo.

En el desarrollo del balance hídrico es fundamental conocer los valores anuales tanto de escurrimiento como de la evapotranspiración en el lugar, para esto es necesario los datos de precipitación como los de temperatura en años anteriores. Para la recolección de estos datos se utilizaron 3 diferentes estaciones tanto climatológicas como pluviométricas con más cercanía hacia la zona de estudio siendo las pluviométricas Pannels [24010840] y combita [24030310] y la climática UPTC [24035130]. Para dar como respuesta el objetivo específico dos, comparar el desarrollo de las plantas en base al índice de estrés hídrico en el ciclo fenológico en relación con el balance hídrico de la zona del cultivo, se expone lo siguiente resultados.

. Acordé a estos datos obtenidos, se verificó la existencia de datos faltantes de cada estación allá ando como resultado que la estación más cercana pannels del municipio de Motavita no contaba con los registros del año 2023 pero sí con registros de años anteriores, conjuntamente se opta para el balance de hídrico la utilización de estos datos y como respuesta a las lluvias sobre el cultivo durante el mes de crecimiento la estación de combita, se determinan las variables de evapotranspiración que permita acondicionar al modelo de balance hídrico las pérdidas por está,

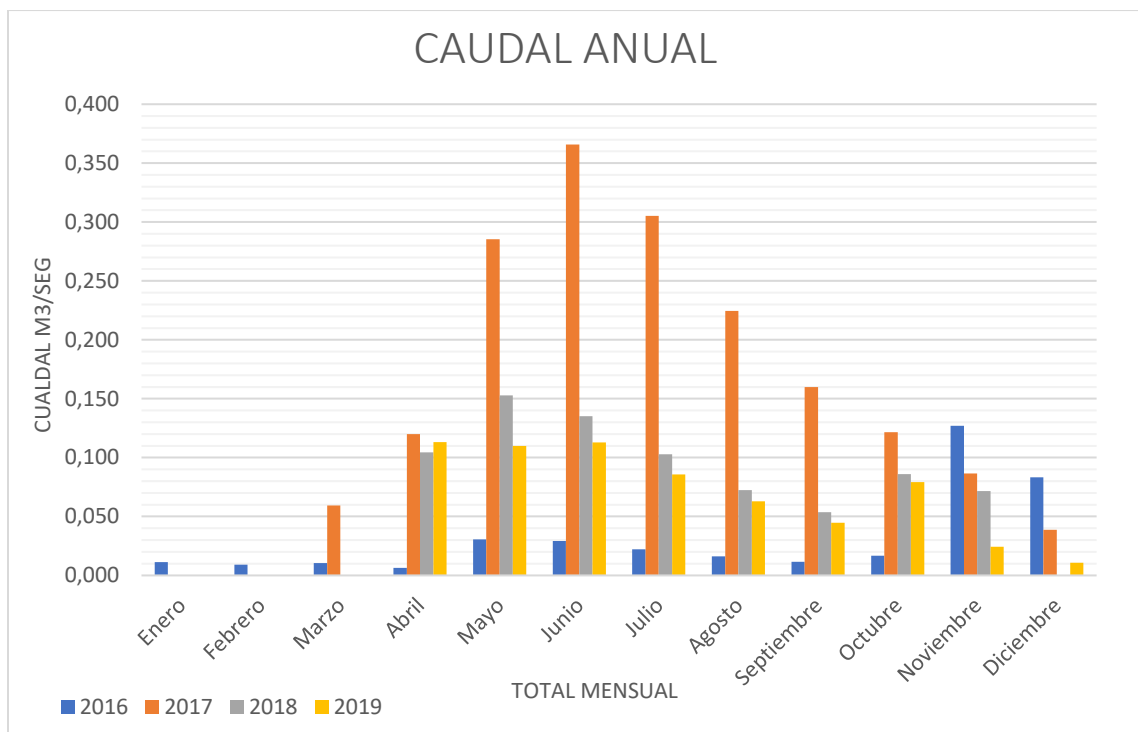
adicional a esto se debe de conocer el número de curva del terreno para la obtención de la precipitación efectiva dentro de las posibles tormentas generadas anualmente. Como resultado se calculó los caudales multianuales pertenecientes entre el año 2016 y 2019, cómo se observa en la *Tabla 3*, dando como escorrentía promedio 0,074 metros cúbicos sobre segundo en un intervalo mensual que puede ser aprovechada para el riego de dicho cultivo.

Tabla 3: Tabla de Caudales mensuales multianual (m³/seg)

MES	2016	2017	2018	2019
ENERO	0,011	0,000	0,000	0,000
FEBRERO	0,009	0,000	0,000	0,000
MARZO	0,010	0,059	0,000	0,000
ABRIL	0,006	0,120	0,104	0,113
MAYO	0,031	0,285	0,153	0,110
JUNIO	0,029	0,366	0,135	0,113
JULIO	0,022	0,305	0,103	0,086
AGOSTO	0,016	0,224	0,072	0,063
SEPTIEMBRE	0,012	0,160	0,054	0,045
OCTUBRE	0,017	0,122	0,086	0,079
NOVIEMBRE	0,127	0,087	0,072	0,024
DICIEMBRE	0,083	0,039	0,000	0,011

Fuente: Autor (es)

Paralelamente a los datos de es correntía se evidencia la incidencia de lluvias en la *Gráfica 1*, de la cual se observa que los últimos años los meses de mayor precipitación están abarcados entre abril y Julio; Es importante tener en cuenta que se registran fenómenos naturales en los últimos años a su vez como el de la niña que permiten obtener mayor oferta de hídrica por las continuas lluvias contrario al fenómeno del niño; quedando así evidenciado las grandes variaciones que preceden un año a otro siendo el 2016 y 2019 los año más seco en la zona y el 2017 el año con mayor precipitaciones dentro de los años estudiados.



Gráfica 1: Caudales mensuales multianual (m³/seg)

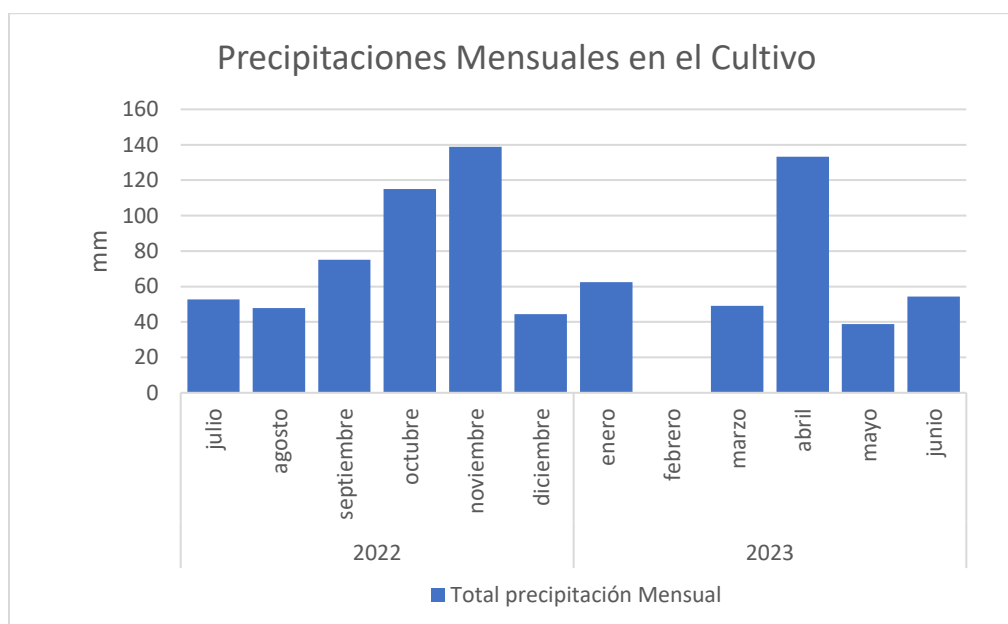
Fuente: Autor (es)

Por consiguiente al balance hídrico se tener en cuenta las diferentes precipitaciones que afectaron al cultivo permitiendo así una poca o es mesurada obtención de dicho recurso, por ende se estableció con los datos propiciados por la estación pluviométrica el total de milímetros en lluvia por mes, como ouede observar en la siguiente tabla:

Tabla 4: Tabla de precipitación mensual periodo 2022-2023

AÑO	MES	PRECIPITACIÓN (MM/MES)
2022	julio	52,7
	agosto	47,8
	septiembre	75,1
	octubre	115
	noviembre	138,9
	diciembre	44,3
2023	enero	62,4
	febrero	6
	marzo	49
	abril	133,2
	mayo	38,7
	junio	54,3
TOTAL		811,4

Fuente: Autor (es)



Gráfica 2: Precipitación mensual periodo 2022-2023

Fuente: Autor (es)

Como se indica en la *Gráfica 2* se evidencia altas lluvias en el mes de noviembre del 2022 y en abril del 2023 pero por el contrario tanto el mes de mayo como el mes de febrero del 2023 se reportan menos incidencias de lluvias, según (Corporación, 2000) las condiciones óptimas agroclimatológicas para los cultivos de papa en relación con el suministro de agua para el cultivo debe estar situada entre los 600 a 800 mm al año con una distribución semejante en cada mes, lo que permite corroborar que en el tiempo de crecimiento y desarrollo del cultivo no se contó con suficiente riego a través de las lluvias y a su vez no se tuvo un control de riego paralelamente distribuido en el cultivo dando a entender en comparación con los mapas del índice de estrés hídrico que los datos obtenidos tienen coherencia en la existencia de un estrés hídrico y evidenciando la obligación de una estrategia de riego pertinente para el aprovechamiento óptimo de éste. Demostrando así en el proyecto de vuelo número 3 una baja incidencia de crecimiento en las plantas del cultivo y reflejando así un índice alto de estrés hídrico, pero por el contrario viéndose un gran cambio en el proyecto de vuelo número 4 donde se puede observar una disminución a lo largo del cultivo del índice de estrés hídrico.

7.5. Estrategia de aprovechamiento del recurso hídrico para tener un control satisfactorio del CWSI en cultivos de papa.

En la actualidad una de las problemáticas ambientales más significativas ha sido la del cambio climático, teniendo como repercusión la afectación de la oferta hídrica. Como bien se sabe el agua es el motor de la vida de todos los seres vivos y si existiera la falencia de esta se generaría dificultades en los ecosistemas y en la agricultura. Es por ello por lo que esta investigación motivo a realizar búsqueda de soluciones por medio de una investigación bibliográfica que permita identificar las mejores estrategias para el uso eficiente del recurso hídrico. En Colombia la agricultura al ser uno de los sectores con mayores actividades productivas genera una alta demanda del recurso, por cual se ha venido evidenciando que un gran porcentaje de este se desperdicia en el momento de realizar el riego en los cultivos.

Para dar como respuesta el objetivo específico tres, formulación por medio de un estudio bibliográfico una estrategia de aprovechamiento del recurso hídrico para tener un control

satisfactorio del (CWSI) en cultivos de papa. Se dispone del análisis y de los siguientes resultados en el estudio bibliográfico:

A partir de lo anterior según (Panme Akangle & Narayan Sethi, 2022) el modelo CROPWAT, es el mejor software presente para calcular las necesidades hídricas, en función de los caudales, momento de riego, precipitaciones y temperaturas para determinar el tipo de suelo, además de esto brinda estadísticas para conocer el requerimiento de agua de cultivo (CWR). Es por esto por lo que se espera conocer el cálculo del CWSI por medio del procesamiento de imágenes fototérmicas captadas por dron.

Este modelo es una herramienta valiosa para la planificación y gestión del recurso hídrico, ya que esta evalúa unos requerimientos con respeto al recurso hídrico y a la parte agrícola, por lo que al realizar la programación de riego se basa de factores que estiman las necesidades que presenta la zona de estudio. Posterior de los cálculos que general el modelo CROPWAT se pueden diseñar estrategias de riego que son efectivas ayudando a la conservación del recurso hídrico y a mejorar la productividad agrícola (Ramirez Arteaga , Ángeles Montiel , & Vázquez Peña, 2011). A demás este modelo va más allá de poder estimar un uso eficiente de riego en los cultivos, debido a que este tiene la capacidad de evaluar los déficits de humedad del suelo por lo que ayuda a prevenir los impactos potenciales del estrés hídrico y tener un mayor rendimiento en la zona de referencia. De tal forma, este modelo presenta una facilidad de evaluación de diferentes escenarios de riego para así poder ofrecer al agricultor información sobre las posibles pérdidas que se presentaran por un riego inadecuado (Cavero, Farre, Debaeke, & Faci, 2000).

La confiabilidad de CROPWAT radica desde los principios científicos sólidos y las ecuaciones adecuadas y aceptadas, no obstante, su precisión radica en gran parte de la calidad de datos que se ingresan al modelo, incluidos los parámetros climáticos. Este puede presentar limitaciones en la caracterización de las condiciones específicas del área y presentar interacciones más complicadas. Por lo que este modelo evalúa su confiabilidad con las mediciones de campo para así rectificar sus predicciones con respecto a sus condiciones locales y la calidad de los datos (VOZHEHOVA, y otros, 2018). También una de sus finalidades encontradas bibliográficamente fue la comparación de una evaluación del uso de agua entre dos cultivos, donde este ayudo a generar una descripción del uso del recurso hídrico en cada uno, involucrando una distribución para que cada cultivo para que estos tuvieran un riego y cada uno pudiera generar su crecimiento. Este modelo en dicha

investigación tuvo como finalidad caracterizar las diferencias más denotadas de la huella hídrica que estos presentaron, para así poder brindar información con respecto a técnicas y prácticas agrícolas sostenibles para la región (Fuster Castro , 2018).

Por otro lado, otro de los métodos utilizados para calcular el requerimiento de agua para los cultivos encontramos es el método lisimétrico el cual se utiliza para medir el consumo real de agua del cultivo de papa a lo largo de sus etapas de crecimiento. El método mencionado anteriormente, proporciona datos con precisión sobre las necesidades de agua en el cultivo, lo que permite determinar exactamente los valores de K_c (coeficiente único de cultivo) debido a que estos permiten obtener aquellas estrategias de riego que son más eficientes y sostenibles (Quispe Rodriguez, Quispe Quezada, Hinojosa Benavides, & Quispe Medrano , 2020). Otro caso donde fue utilizado este método y a su vez un dron donde se generaron imágenes combinadas con los datos lisimetricos demostró que los valores de K_c (coeficiente único de cultivo) son precisos, lo que permite evidenciar que este método presenta un gran potencial en las técnicas de teledetección para mejorar la gestión de los cultivos de papa (Ruiz, Montalvo Arquíñigo , & Alarcon, 2016).

La ecuación de Penman-Monteith, es otra forma de calcular el requisito de agua en los cultivos, este es de gran importancia ya que un método integral para estimar la evapotranspiración, en este artículo hace parte de la cuantificación precisa de los requerimientos de agua, ya que al ser parte de los modelos de simulación agroclimática mejora su precisión ayudando a tener una mejor gestión del agua y tener una programación óptima en el riego (Cleves L, Toro C, & Martinez B, 2016).

Por último, esta ecuación requiere de una calibración a ciertos parámetros los cuales deben ser ajustados para ser compatibles con las características ambientales que se tiene en su entorno, como lo es en este caso el invernadero y a su vez poder garantizar cálculos más precisos. Esta fórmula tiene una determinación más precisa en cuanto a los requisitos de agua y el uso eficiente del riego ayudando al crecimiento de las plantas en el invernadero (Butrón Mamani, 2017).

Luego de obtener esta revisión bibliográfica utilizando fuentes como Scopus, Sciencedirect, Scielo y Google Scholar, se pudo obtener la estrategia correspondiente al aprovechamiento del recurso hídrico que permita tener un control satisfactorio del índice de estrés hídrico. Para ellos se reconoció que el sistema y modelo FAO CROPWAT 8.0 es una herramienta de apoyo a la toma de decisiones desarrollada por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la

Alimentación (FAO). Está diseñado para la estimación de los requisitos de agua de los cultivos y para el desarrollo de programas de riego en condiciones variables de disponibilidad de agua. Al considerar estrategias de uso de recursos hídricos para controlar el estrés hídrico en cultivos de papa, el modelo CROPWAT se destaca por varias razones. Ya que este se basa en el método Penman-Monteith ampliamente aceptado para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o) y, posteriormente, los requisitos de agua del cultivo. Tiene una base científica sólida que hace que sus predicciones sean confiables.

Por otro lado, se encuentra el coeficiente de cultivo personalizados, esto se debe a que el software utiliza coeficientes de cultivo específicos (K_c) para varias etapas de crecimiento del cultivo de papa. Esto garantiza que los requisitos de agua se calculen con gran precisión en función de la etapa real de desarrollo del cultivo. De igual forma, la integración de datos del suelo que permite a los usuarios ingresar datos locales del suelo, lo que ayuda a determinar la capacidad de retención de agua y, por lo tanto, ayuda a determinar las necesidades de riego con mayor precisión.

Así mismo, la utilidad de datos climáticos del modelo puede utilizar datos climáticos de años anteriores de las estaciones climáticas las cuales determinaran las necesidades de agua. Esta flexibilidad permite tanto la planificación a largo plazo como los ajustes de riego a corto plazo. Luego está programación de riego ayuda a los agricultores a desarrollar programas de riego que se basan en los requisitos reales de agua de los cultivos de papa. Al garantizar que el agua que se aplique en un momento adecuado y en las cantidades correctas, se puede minimizar el estrés hídrico, optimizando el rendimiento y la calidad del cultivo de papa.

Así mismo el análisis de escenarios del software permite a los usuarios simular diferentes escenarios, como patrones de lluvia, disponibilidad de agua e impactos del cambio climático. Ayudando a los agricultores a incentivar esta estrategia para mejorar las prácticas de gestión del agua en diferentes futuros posibles. Del mismo modo, la facilidad de uso y accesibilidad del CROPWAT 8.0 Esto lo hace accesible a una amplia gama de usuarios, desde agricultores locales hasta planificadores agrícolas.

Por último, se encuentra el análisis de estrés hídrico en donde esta herramienta también ayuda a analizar los períodos de estrés hídrico que pueden ser vitales para los cultivos de papa que tienen requisitos específicos de agua durante las etapas de iniciación del tubérculo y volumen, y el reconocimiento Global dado que presenta respaldo por parte de la FAO, la herramienta es

reconocida y utilizada en todo el mundo. Este reconocimiento global garantiza actualizaciones periódicas, mejoras y apoyo de la comunidad.

Formulación de una estrategia para el uso eficiente y eficaz del agua en el momento de riego

Cuando se pretende utilizar esta herramienta para el uso eficiente y eficaz de los recursos hídricos y para el control del índice de estrés hídrico, se pueden implementar las siguientes estrategias:

Ingreso de datos de cultivos: asegúrese de ingresar datos precisos sobre el cultivo específico con el que está trabajando. Esto incluye los coeficientes de cultivo, las fechas de siembra, las fases de crecimiento y la profundidad de penetración de las raíces.

Datos climáticos: use conjuntos de datos climáticos locales confiables para garantizar cálculos precisos de evapotranspiración. Esto ayudará a predecir las necesidades de agua en función de las condiciones meteorológicas actuales y pronosticadas.

Monitoreo regular: actualice con frecuencia el modelo con datos en tiempo real para ajustar los programas de riego en función de los patrones climáticos cambiantes, los niveles de humedad del suelo y las etapas de crecimiento de los cultivos.

Datos de lluvia: incorpore la lluvia esperada en el programa de riego para aprovechar la precipitación natural, lo que puede ayudar a reducir la necesidad de riego.

Riego deficitario: en función del índice de estrés hídrico y la tolerancia del cultivo, aplique riego deficitario en etapas de crecimiento no críticas para ahorrar agua sin afectar significativamente el rendimiento.

Tecnologías avanzadas: integre el modelo con sensores de humedad del suelo y datos de teledetección para obtener una visión más precisa de las necesidades de agua en puntos específicos del campo.

Eficiencia de Riego: Asegúrese de que el sistema de riego en sí sea eficiente. Esto incluye verificar si hay fugas, garantizar una distribución uniforme del agua y posiblemente actualizarse a métodos de riego más eficientes, como sistemas de goteo o aspersión.

Educación y capacitación: asegúrese de que los responsables de la gestión del riego comprendan los principios del modelo CROPWAT y puedan interpretar sus resultados correctamente.

Ciclo de retroalimentación: después de la cosecha, compare los rendimientos reales y el uso de agua con las predicciones del modelo. Utilice estos comentarios para refinar las entradas y mejorar la precisión del modelo para la próxima temporada.

Compromiso de las partes interesadas: comprometerse con las autoridades locales de gestión del agua, los agricultores y otras partes interesadas para adoptar y promover los principios del uso eficiente del agua según lo recomendado por el modelo CROPWAT.

Al seguir estas estrategias, los usuarios pueden optimizar el uso del agua, reducir el desperdicio y garantizar que los cultivos se mantengan saludables incluso en condiciones de escasez de agua.

8. CONCLUSIONES

Contemplando los resultados obtenidos en esta investigación es oportuno concluir que la insuficiencia del recurso hídrico dentro del cultivo demuestra un porcentaje de bajo crecimiento de las plantas, puesto que una de las partes importantes en el desarrollo en su ciclo fenológico es la obtención de suficiente agua para el crecimiento del follaje que permita así a su vez la captación de los nutrientes necesarios en su ciclo de vida. Relacionado a esto, se evidencia que dicha insuficiencia es perceptible a través de la temperatura del follaje de las plantas en comparación a la temperatura ambiente de la misma que se puede estimar a través del índice de estrés hídrico. No obstante, es oportuno encontrar la oferta hídrica para equilibrar dicha demanda de agua a través de los diferentes sistemas de cálculo, y obteniendo así una eficacia y eficiencia en el manejo del recurso hídrico y posteriormente en la producción del mismo cultivo.

La construcción de un balance hídrico dentro de la zona permite tomar diferentes decisiones para el manejo eficiente y las estimaciones de la oferta hídrica que se puede encontrar en esta zona sobre los posibles cultivos a siembra, con llevando así a implementar diferentes sistemas de recolección y distribución, evitando así que las plantas generen un estrés a partir de la poca oferta hídrica que se encuentra en la zona. Respecto al cultivo estudiado cabe resaltar que por las condiciones climatológicas que se encuentran en la zona lo guían poseer alrededor de un 30% de este estrés en el área del cultivo afectando tanto la productividad como el desarrollo óptimo de las plantas. En los últimos años se evidenció diferentes comportamientos meteorológicos, puesto que entre los años estudiados de 2016 a 2019 se presentan grandes variaciones la precipitación dando como resultado una temporada de año seco al igual que una temporada de año húmedo donde se debe tener muy en cuenta para hacer posible la tecnificación al cultivo y evaluar los posibles escenarios hacia las siembras futuras para la mitigación de CWSI.

El análisis bibliográfico demuestra que el modelo de FAO CROPWAT 8.0 es capaz de generar estrategias positivas e importantes para la gestión del recurso hídrico, con el fin de disminuir los impactos y las problemáticas que se presentan al momento de generar un riego excesivo, por lo que permitirá la disminución del índice de estrés hídrico que presenta la planta de papa (*Solanum Tuberosum*). Por otro lado, es importante mencionar, que el uso de esta herramienta es fundamental para la toma de decisiones y la planeación al momento de hacer la iniciación de una cosecha para

garantizar una productividad de calidad. Además, se pudo identificar que el modelo cuenta con los métodos mencionados en la revisión para la estimación del recurso hídrico, ya que están incorporados y hacen parte del conjunto de cálculos que generan el momento del riego, así mismo estos procedimientos son de gran importancia ya que contribuyen a la planificación del riego y las mediciones reales en campo validando así sus resultados por medio del modelo CROPWAT 8.0 teniendo mayor confiabilidad como estrategia para el aprovechamiento del recurso hídrico.

9. RECOMENDACIONES

- Se recomienda estimar los datos de las variables tanto climatológicas como meteorológicas por medio de un sistema diferente a los datos encontrados en la página de datos hidrometeorológicos del IDEAM, puesto que algunas estaciones pueden encarecer de datos, encontrarse las estaciones en mantenimiento o simplemente una suspensión de está, ocasionando un error de esa actitud aún mayor.
- Se sugiere el uso de un software que permita calcular el momento de riesgo con mayor precisión y efectividad o que apoye en los cálculos pertinentes, adicionalmente se recomienda a futuros trabajos hacer la clasificación y muestreos de suelos, conllevando variables como humedad y porosidad para realizar una comparación en los suelos, además si se prevé utilizar ese tipo de metodología para otro cultivo es necesario establecer el factor de corrección que varía al tipo de cultivo utilizado.
- Para una investigación más detallada que relacione también el cálculo de la productividad del cultivo se sugiere estipular un sistema que permita medir las proporciones de crecimiento de la planta, no sólo de su follaje sino también de sus raíces y su tallo, comparando sujetos con y sin CWSI.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Capraro, F., Tosetti, S., & Gimenez, J. (2019). Cálculo de CWSI en base a imágenes termográficas para el análisis de estrategias de riego deficitario en tomate . *Instituto de Automática INAUT (UNSJ – CONICET)*, 83-98 ISSN: 2525-0949.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2017). *Ley 1876 de 2017*.
- Moreno, L. P. (2009). Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. *Departamento de Agronomía*, 179-191.
- Aguirre Forero, S. E. (2012). Sistema de producción de tubérculos andinos en Boyacá, Colombia. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, vol. 9, núm. 69, 257-273.
- Alvarado G., Á. E. (2007). Caracterización de zonas sensibles a heladas en el cultivo de papa (*solanum tuberosum*). *Ciencia y Agricultura*, vol. 5, núm. 2, 29-38.
- Aragones, J. (. (2003). Revisando el concepto de desarrollo sostenible en el discurso social. *Psicothema*, 221-226.
- Barragan, J. (2019). La Papa Incluida- Desempeño y perspectivas económicas del subsector papa 2018-2019. *Revista Papa*, 47-48.
- Bozkurt Çolak, Y., Yazar, A., Çolak, İ., & Akça, H. (2015). Evaluation of Crop Water Stress Index (CWSI) for Eggplant under Varying Irrigation Regimes Using Surface and Subsurface Drip Systems. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 4, 372-382.
- Burbano Vistin, C. R. (2015). "LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DEL BARRIO LA CRISTALINA DE HUARCAY, ETAPA CUATRO, PARROQUIA LA ECUATORIANA, CANTÓN QUITO, PROVINCIA DE PICHINCHA". *UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR* .
- Butrón Mamani, C. (2017). *CALIBRACIÓN DE LA ECUACIÓN FAO PENMAN-MONTEITH PARA*. Obtenido de <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/15245/TM-2461.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2015). Manual PAPA. *Programa de Apoyo Agrícola y Agroindustrial Vicepresidencia de Fortalecimiento Empresarial*.
- Casiano Dominguez, M. &. (2018). Patrones espectrales de la fenología del desarrollo vegetativo y reproductivo de árboles de huizache (*Acacia farnesiana* (L.) Willd.). *Terra Latinoamericana*, 36(4), 393-409.
- Cavero, J., Farre, I., Debaeke, P., & Faci, J. (2000). Simulation of Maize Yield under Water Stress with the EPICphaseand CROPWAT Models. *Agronomy Journal*.
- Chow, V. T. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGRAW-HILL, Inc.
- Cleves L, J., Toro C, J., & Martinez B, L. (2016). Los balances hídricos agrícolas en modelos de simulación agroclimáticos. Una revisión analítica. *Revista Colombiana de Ciencias hortícolas* , 149-163.
- CMGRD, C. M. (2016). *Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres*. Alcaldía de Motavita.

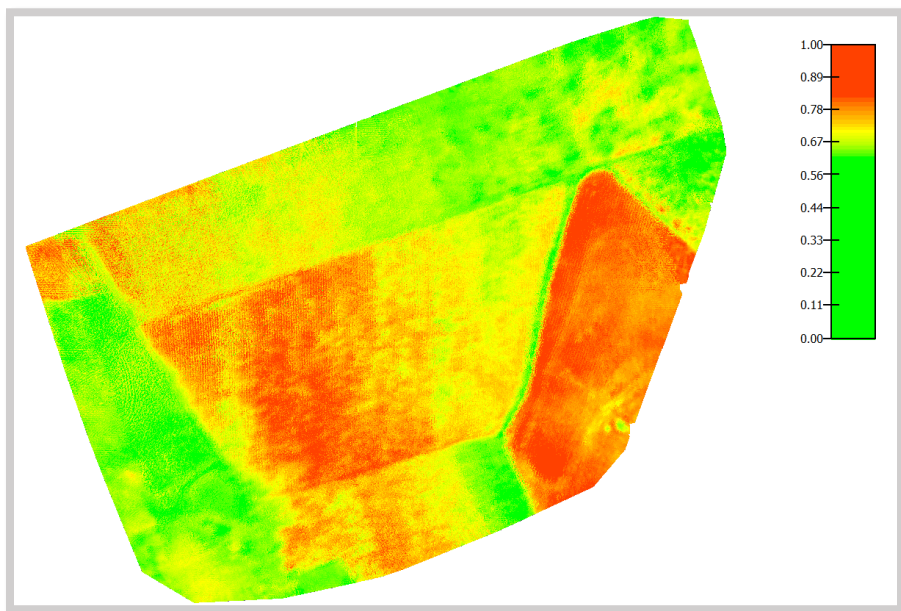
- Condiza, C. A. (2018). Agricultura Sostenible .
- Corporación, C. d. (2000). *Manejo integrado del cultivo de la papa: manual técnico*. Bogotá: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria.
- DANE. (Septiembre de 2013). Boletín Mensual: Insumos y Factores Asociados a la Producción Agropecuaria. pág. 92.
- Devaux, A., Kromann, P., & Ortiz, O. (2014). Potatoes For Sustainable Global Food Security. *Potato Research*, 57 (3-4), 185-199.
- Durán Gómez, M. R. (2021). Imagen térmica y sensores de termopares para estimar el índice de estrés hídrico del cultivo de arroz bajo riego por goteo. *Idesia (Arica)*, 39(1), 109-118.
- El Congreso De Colombia. (23 de Enero de 2009). *Función Pública*. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=34850>
- Estacio Rodriguez, C. A. (2018). Sistema de protección ante las heladas, para los cultivos de papa del territorio cundiboyacense. *Pontificia Universidad Javeriana*.
- FAO . (2011). *Manual de Buenas Prácticas Agrícolas*. Santiago de Chile.
- FAO. (2020). Evapotranspiración del cultivo . *Estudio FAO riego y Drenaje* , ISSN 0254-5293.
- Función Pública. (1997). *Ley 373 de 1997*.
- Función Pública. (2014). *Ley 1731 de 2014*.
- Función Pública. (2015). *Decreto 1076 de 2015*.
- Fuster Castro , V. (2018). *La simulación prospectiva mediante el software Cropwat para la determinación de la Huella Hídrica influye en los cultivos de la papa amarilla "Solanum Phureja" y el maíz choclo "Zea Mays" del distrito de Chaglla, departamento de Huánuco*. Obtenido de https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/21820/Fuster_CV.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Galeana-Pérez, V. M.-A.-A.-C. (2023). Medición de asentamientos en pavimentos dañados por subsidencia usando ortomosaicos y MDE mediante GPS y VANT. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 24(2)Epub 19 de mayo de 2023.
- Gomez, O. C., & Triana, C. F. (2012). Actualización nota Técnica Heladas . *IDEAM* , 12-24.
- ICA, I. C. (2011). *Manejo Fitosanitario del Cultivo de papa*. Bogotá: Produmedios.
- Lopera Gómez, M. J., Campos, S. M., & Olarte, B. C. (2012). Segundo reporte nacional: producción de aguas servidas, tratamiento y uso en Colombia . *Republica de Colombia* .
- López López, R., Arteaga Ramírez, R., & Vázquez Peña, M. (2009). Índice de estrés hídrico como un indicador del momento de riego en cultivos agrícolas. *Agricultura técnica en México*, 97-111.
- Luna, W., Estrada, H., Jiménez, J., & Pinzón, L. (2012). Efecto del estrés hídrico sobre el crecimiento y eficiencia del uso del agua en plántulas de tres especies arbóreas caducifolias. *Terra Latinoamericana*, 343-353.

- Magnus, D. L., Sharda, A., & Zhang, N. (2016). Development and evaluation of thermal infrared imaging system for high spatial and temporal resolution crop water stress monitoring of corn within a greenhouse. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149-159.
- Mendoza, P., & Rodríguez, M. (2001). Obtención de imágenes térmicas y termoelectrónicas mediante Radiometría Fototérmica Infrarroja Superficies y vacío. *Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales A.C.*, 28-32.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2006). *Ley 187*.
- Ministerio de Transporte. (2018). *Resolución 04201 de 2018*.
- Motavita, C. M. (2012). *Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres CMGRD*. Motavita .
- Nely Pérez Martínez. (2021). *La papa nativa en Boyacá: un esfuerzo de cohesión desde la cadena productiva*. Tunja: AltaVoz Editores.
- O. Sepúlveda Delgado, Z. E. (2015). Estudio del comportamiento e impacto de la climatología sobre el cultivo de la papa y del pasto en la región central de Boyacá empleando los sistemas dinámicos. *Universidad Nacional de Colombia*.
- Pachas, R. L. (2009). El levantamiento Topográfico: Uso del GPS y estación total. *Universidad de los Andes (ULA)*, 29-45 ISSN 1690-3226.
- Panme Akangle, F., & Narayan Sethi, L. (2022). *Estimation of Crop Water Requirements and Irrigation Scheduling for Major Crops Grown in India's North-Eastern Region*. Obtenido de file:///C:/Users/grupo/Downloads/Estimation-of-Crop-Water-Requirements-and-Irrigation-Scheduling-for-Major-Crops-Grown-in-Indias-NorthEastern-RegionCurrent-Applied-Science-and-Technology.pdf
- Perez Cubas, H. (2020). *Estimación del estrés hídrico del cultivo de arroz a partir de imágenes térmicas de un VANT en Ferreñafe, Lambayeque*. Lambayeque : UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO.
- Perfetti, J. J., Balcazar, A., & Antonio, H. (2013). Políticas para el desarrollo de la agricultura en Colombia. *Fedesarrollo*.
- Perfetti, J. J., Balcázar, A., & Hernández, A. (2013). Políticas para el desarrollo de la agricultura en Colombia. *Fedesarrollo, Sociedad de Agricultores de Colombia (SAC)*.
- Quirós Rosado, E. (2014). Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil . *Universidad de Extremadura* , I.S.B.N. de méritos: 978-84-697-1317-4.
- Quispe Rodriguez, J., Quispe Quezada, U., Hinojosa Benavides, R., & Quispe Medrano , J. (2020). Determinación de coeficientes de uso consuntivo (Kc) en cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) por el método lisimétrico en el valle del Mantaro. *Universidad Nacional Autónoma de Huanta*.
- Ramirez Arteaga , R., Ángeles Montiel , V., & Vázquez Peña, M. (2011). PROGRAMA CROPWAT PARA PLANEACIÓN Y MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 179-195.

- Rud, R. C. (2014). Crop water stress index derived from multi-year ground and aerial thermal images as an indicator of potato water status. *Precision Agric*, 273-289.
- Ruiz, D. M., Martinez, J. P., & Figueroa, A. (2015). Agricultura Sostenible en ecosistemas de alta montaña. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, vol 13, 129-138.
- Ruiz, J., Montalvo Arquíñigo, N., & Alarcon, P. (2016). Determinación del coeficiente del cultivo y parámetros biométricos basados en imágenes captadas con drone, lisímetros de drenaje y métodos indirectos para el cultivo de papa solanum spp. *Rev. del Instituto de Investigación (RIIGEO), FIGMMG-UNMSM DETERMINACIÓN*.
- Salvador, R., & Cibrián, R. (2013). Estudio de la precisión de la Imagen Térmica Infrarroja en el diagnóstico de lesiones traumatológicas en la edad pediátrica. 7-13.
- Sandaña, P. C., & Martínez, C. A. (2018). *Morfología y Fisiología de la planta*. Boletín INIA N° 396.
- Santa Coloma, V. . (2015). Importancia de la economía campesina en los contextos contemporáneos: una mirada al caso colombiano. *Entramado. Julio - Diciembre*, vol. 11, no. 2, p. 38-50.
- Sergio Arriola, V., Amit Ferencz, A., & Renato Rimolo, D. (2018). Fotogrametría terrestre con sistemas aéreos autónomos no tripulados . *Investiga TEC* , 9-12.
- Shadman, V., Saeid , H., & Harm, B. (2017). A satellite based crop water stress index for irrigation scheduling in sugarcane fields. *Agricultural Water Management*, 70-86 ISSN 0378-3774.
- Snyder, R., & Matulich, S. (2010). Protección para las Heladas: Fundamentos, Practica y Economia . *Serie sobre el medio ambiente y la gestión de recursos* .
- Sostenible, M. d. (2019). Estrategia de Ordenamiento de la Producción- Cadena Productiva de la papa y su Industria. *Plan de Ordenamiento papa* .
- Turrent, F., Fernández, N., Flores, N., López, A., Martínez, H., Menes, E., . . . Javier, F. (2010). Estimación del escurrimiento superficial con el método SCS-CN en el trópico subhúmedo de México. *Terra Latinoamericana*, 28(1), 71-78.
- Velandia Sánchez, E. A. (2022). Imágenes térmicas y respuestas espectrales para identificar condiciones de estrés hídrico y estado nutricional con relación al nitrógeno en papa amarilla diploide (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja) . *Universidad Nacional de Colombia* .
- Vingola, R., Walter, W., & Morales, M. (Enero de 2017). *Prácticas efectivas para la reducción de impactos por eventos climáticos en el cultivo de papa en Costa Rica*.
- VOZHEHOVA, R., LAVRYNENKO, Y., KOKOVIKHIN, S., LYKHOVYD4, P., BILIAIEVA, I., DROBITKO, A., & NESTERCHUK, V. (2018). Assessment of the CROPWAT 8.0 software reliability for evapotranspiration and crop water requirements calculations. *JOURNAL OF WATER AND LAND DEVELOPMENT*, 147-152.
- WE, E., PK, A., P, B., & KM, B. (2007). Impacts, Adaptation and Vulnerability. *Intergovernmental Panel on Climate Change* , 273-313.

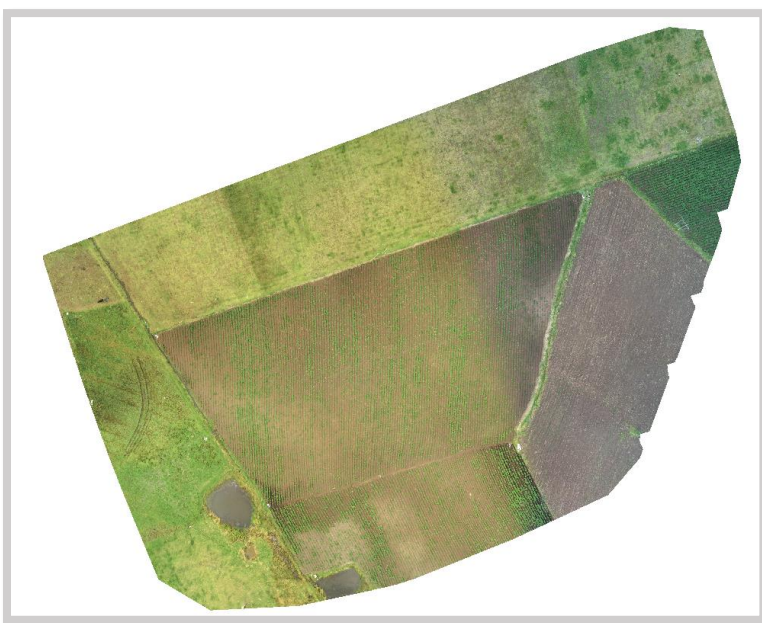
11. ANEXOS

Anexo 1: Mapa de índice de estrés hídrico vuelo número 2



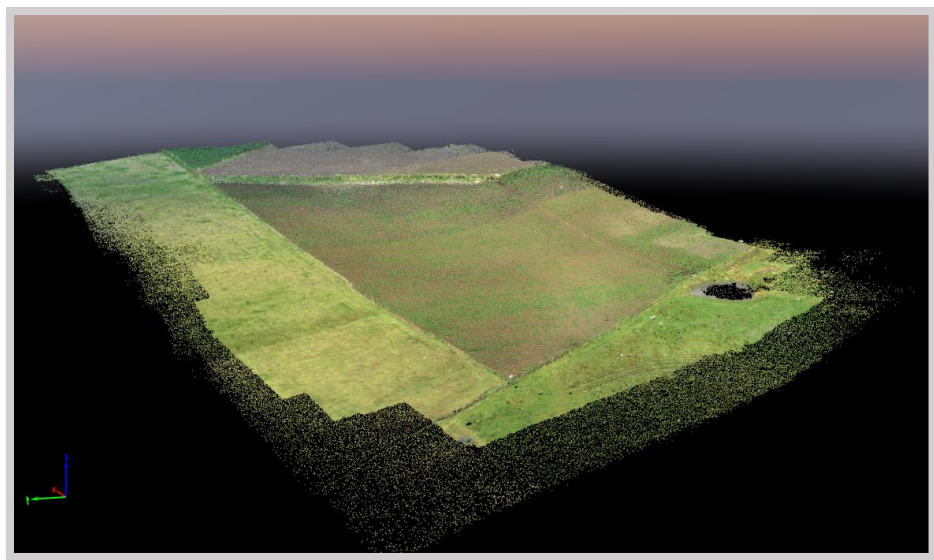
Fuente: Autor (es)

Anexo 2: Ortomosaico del vuelo número 2



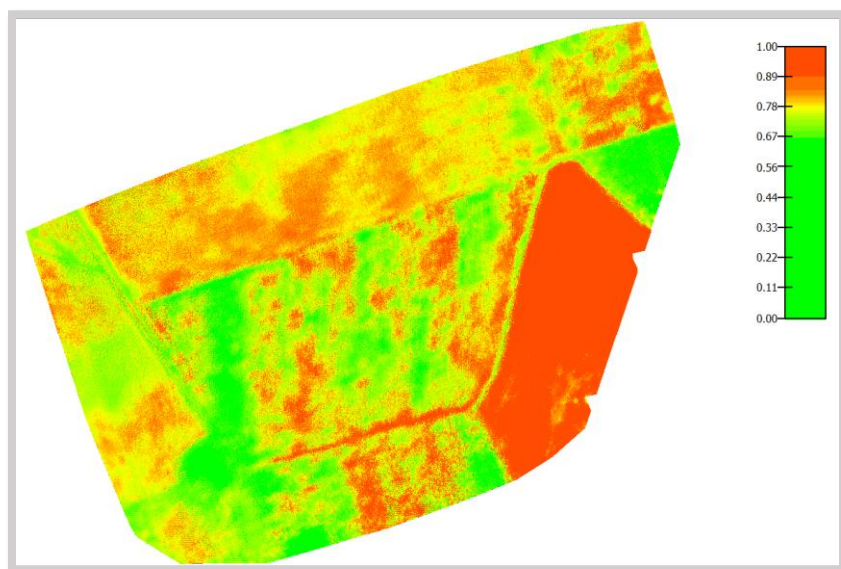
Fuente: Autor (es)

Anexo 3: Modelo digital del terreno vuelo número 2



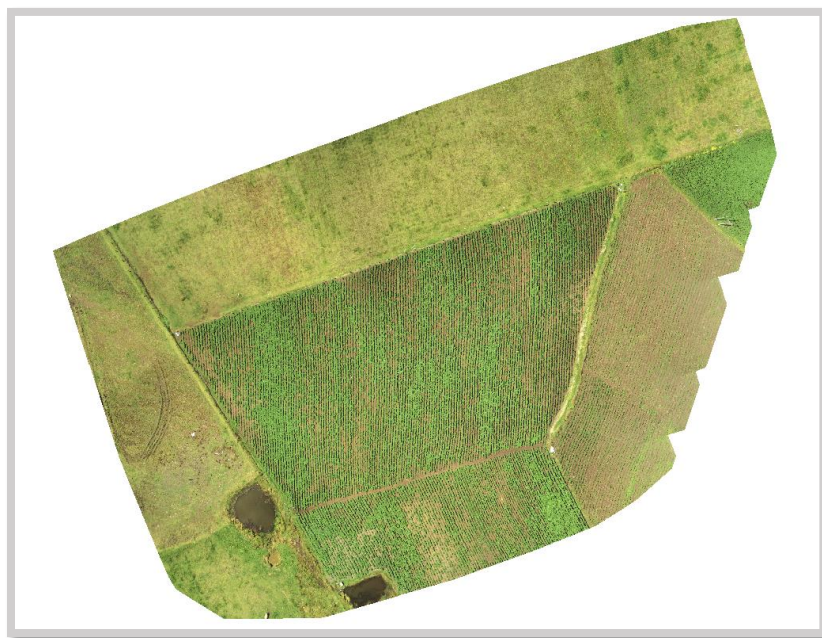
Fuente: Autor (es)

Anexo 4: Mapa de índice de estrés hídrico vuelo número 5



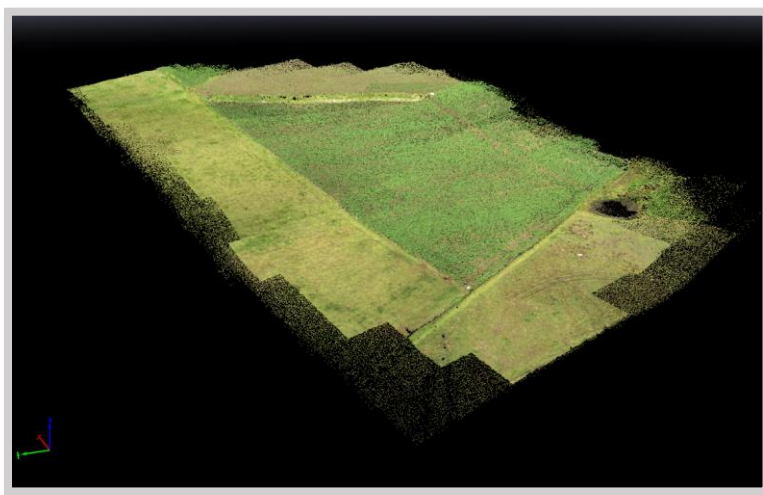
Fuente: Autor (es)

Anexo 5: Ortomosaico del vuelo número 5



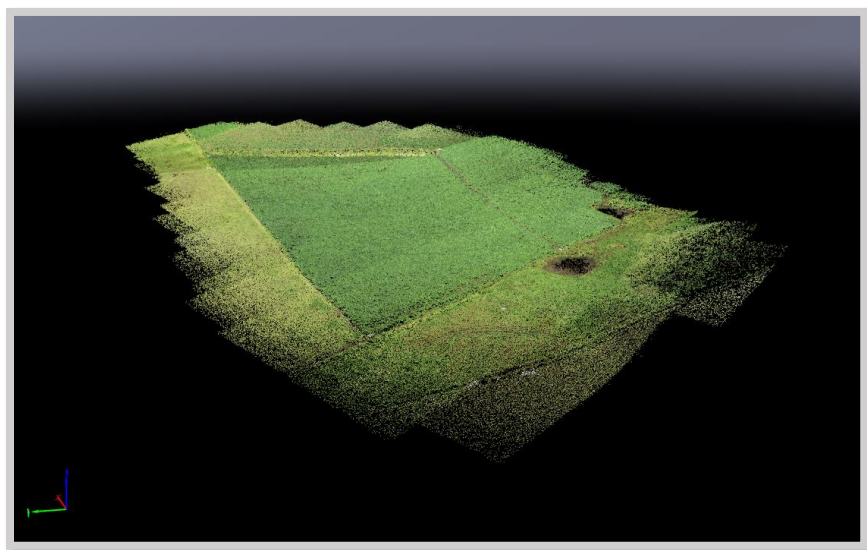
Fuente: Autor (es)

Anexo 6: Modelo digital del terreno vuelo número 5



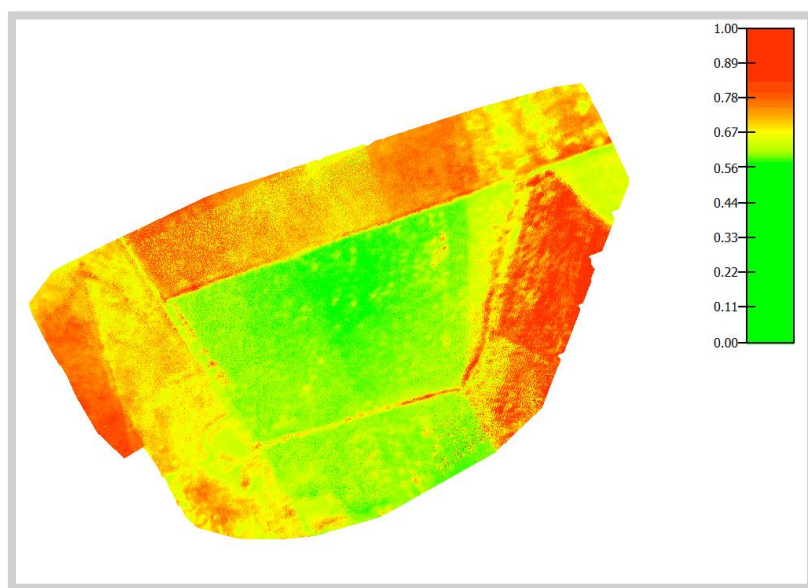
Fuente: Autor (es)

Anexo 7: Modelo digital del terreno vuelo número 7



Fuente: Autor (es)

Anexo 8: Mapa de índice de estrés hídrico vuelo número 8



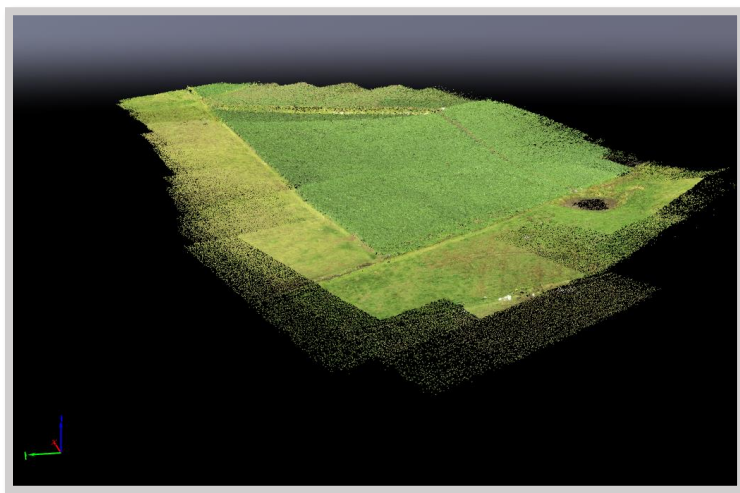
Fuente: Autor (es)

Anexo 9: Ortomosaico del vuelo número 8



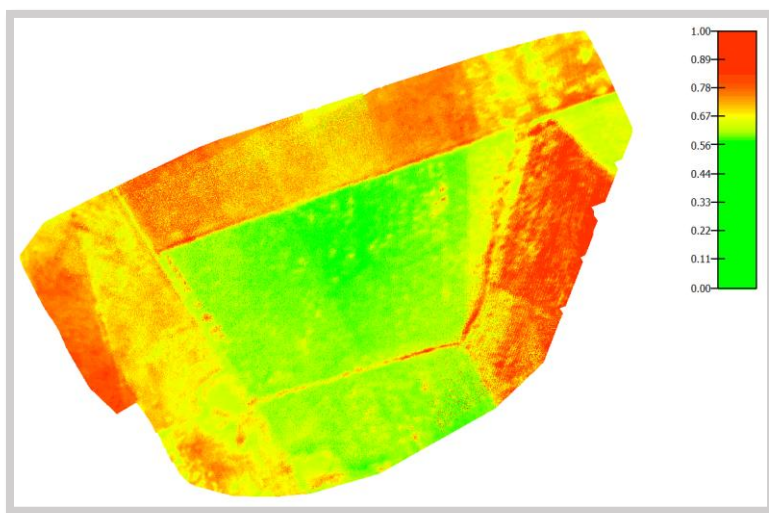
Fuente: Autor (es)

Anexo 10: Modelo digital del terreno vuelo número 8



Fuente: Autor (es)

Anexo 11: Mapa de índice de estrés hídrico vuelo número 9



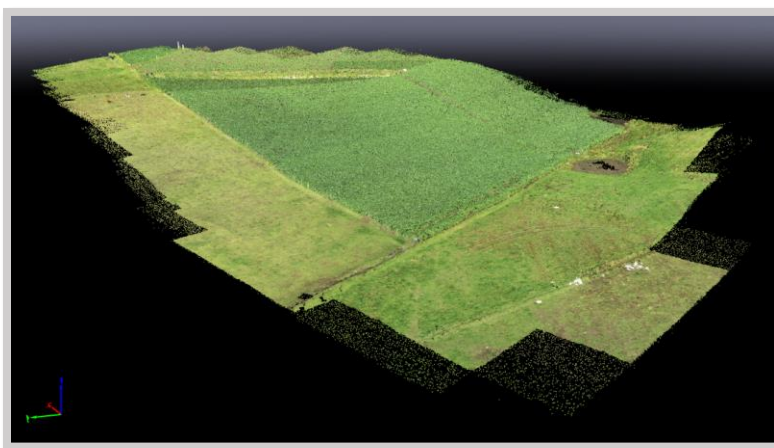
Fuente: Autor (es)

Anexo 12: Ortomosaico del vuelo número 9



Fuente: Autor (es)

Anexo 13: Modelo digital del terreno vuelo número 9



Fuente: Autor (es)

Anexo 14: Acercamiento al ortomosaico del vuelo 7, segmentos del cultivo inconclusos



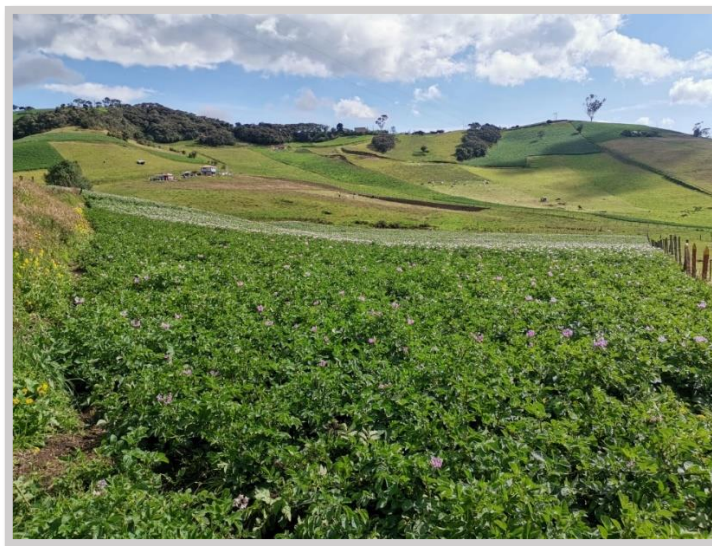
Fuente: Autor (es)

Anexo 15: Delimitación de subcuenca hidrográfica



Fuente: Autor (es) (Google Earth Pro)

Anexo 16: Visualización del área de estudio



Fuente: Autor (es)

Anexo 17: Números de Curva de Escorrentía Ven Te Chow

Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, suburbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad II, $I_a = 0.2S$)					
Descripción del uso de la tierra		Grupo hidrológico del suelo			
		A	B	C	D
Tierra cultivada ¹ : sin tratamientos de conservación		72	81	88	91
	con tratamientos de conservación	62	71	78	81
Pastizales: condiciones pobres		68	79	86	89
	condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos: condiciones óptimas		30	58	71	78
Bosques: troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas,		45	66	77	83
	cubierta buena ²	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.					
	óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más	39	61	74	80
	condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75%	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)		89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)		81	88	91	93
Residencial ³ :					
Tamaño promedio del lote	Porcentaje promedio impermeable ⁴				
1/8 acre o menos	65	77	85	90	92
1/4 acre	38	61	75	83	87
1/3 acre	30	57	72	81	86
1/2 acre	25	54	70	80	85
1 acre	20	51	68	79	84
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc. ⁵		98	98	98	98
Calles y carreteras:					
Pavimentados con cunetas y alcantarillados ⁵		98	98	98	98
grava		76	85	89	91
tierra		72	82	87	89

Fuente: (Chow, 1994)