



**PROGRAMA DE CONSORCIOS REGIONALES DE INVESTIGACION AGROPECUARIA
CRIA OCCIDENTE
CADENA DE MELOCOTÓN**

**“GEOPROCESAMIENTO DE DATOS CLIMÁTICOS Y
SU DISTRIBUCIÓN A FRUTICULTORES DEL VALLE DE
QUETZALTENANGO Y TOTONICAPÁN”**

**Héctor Alvarado Quiroa
Gustavo Adolfo García Chapetón
Edgardo Alfredo Vásquez Gómez
Hugo García Hernández**

Quetzaltenango, Noviembre de 2021





**PROGRAMA DE CONSORCIO REGIONALES DE INVESTIGACION AGROPECUARIA
CRIA OCCIDENTE
CADENA DE MELOCOTÓN**

**GEOPROCESAMIENTO DE DATOS CLIMÁTICOS Y SU
DISTRIBUCIÓN A FRUTICULTORES DEL VALLE DE
QUETZALTENANGO Y TOTONICAPÁN**

**Ing. Agr. Héctor Alvarado Quiroa Ph, D.¹
Ing. MSc. Gustavo Adolfo García Chapetón²
Ing. MSc. Edgardo Alfredo Vásquez Gómez³
Ing. Agr. MSc. Hugo García Hernández.⁴**

Quetzaltenango, Noviembre de 2021

¹ Ingeniero Agrónomo, Maestro en Ciencias en Gerencia de la Agricultura Sostenible y de los Recursos Naturales, Maestro en Ciencias en Administración de Tierras para el Desarrollo Sostenible, Doctor en Ciencias Naturales con énfasis en Gestión Ambiental. Profesor de la División de Ciencia y Tecnología, Centro Universitario de Occidente, Universidad de San Carlos de Guatemala.

² Ingeniero en Sistemas, Maestro en Ciencias de la Geo-información y Observación de la Tierra, con énfasis en Geo-informática. Profesor de la División de Ciencia y Tecnología, Centro Universitario de Occidente, Universidad de San Carlos de Guatemala

³ Ingeniero de Sistemas, Maestro en Ciencias con énfasis en Geo-informática. Profesor en la División de Ciencia y Tecnología del Centro Universitario de Occidente, Universidad de San Carlos de Guatemala.

⁴ Ingeniero Agrónomo en Sistemas de Producción Agrícola, Master en Ciencias de la Geoinformación y Observación de la Tierra, con énfasis en Recursos Hídricos. Profesor de la División de Ciencia y Tecnología, Centro Universitario de Occidente, Universidad de San Carlos de Guatemala

CONTENIDO

SIGLAS Y ACRÓNIMOS.....	1
I. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA.....	5
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
1.3. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.....	8
1.4. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN.....	9
1.5. OBJETIVOS.....	9
1.5.1. General.....	9
1.5.2. Específicos.....	9
II. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1. LOS FRUTALES CADUCIFOLIOS Y SUS REQUERIMIENTOS CLIMÁTICOS.....	11
2.1.1. Frutales caducifolios, deciduos o de hoja caduca.....	11
2.1.2. Problemas de la Fruticultura de caducifolios en regiones subtropicales.....	11
2.1.3. El período de reposo en los frutales caducifolios	12
2.1.4. El papel de la temperatura en los frutales caducifolios.....	13
a. La necesidad de frío invernal	13
b. El valor del concepto de horas frío.....	13
c. Las unidades frío.....	14
d. Las heladas.....	15
2.1.5. Precipitación pluvial.....	15
2.2. GEOPROCESAMIENTO.....	16
2.2.1. Operaciones de Superposición.....	16
2.2.2. Operaciones de Proximidad	17
2.2.3. Operaciones de conectividad	18
2.3. DESARROLLO DE SISTEMAS AGROCLIMÁTICOS.....	18
III. MARCO METODOLÓGICO.....	21
3.1. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	21
3.2. CONTEXTO ESPACIAL Y TEMPORAL.....	21

3.3.	FASES DE LA INVESTIGACIÓN.....	21
3.3.1.	Fase de análisis de requerimientos	23
3.3.2.	Fase de diseño	23
3.3.3.	Fase de desarrollo.....	24
3.3.4.	Fase de evaluación.....	24
IV.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	27
V.	CONCLUSIONES.....	35
VI.	RECOMENDACIONES.....	37
	BIBLIOGRAFÍA.....	39
	ANEXOS.....	41
	Anexo A. Cuestionario SUS para evaluar la usabilidad general del prototipo.....	41
	Anexo B. Boleta para la prueba de funcionalidad y usabilidad.....	42

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Valor de las temperaturas para cálculo de unidades frío.	14
Cuadro 2 Contribución a la calificación de usabilidad.	25

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Tipo de operaciones de traslape entre dos elementos individuales.	17
Figura 2 Zonas de influencia concéntricas a partir de una entidad lineal	17
Figura 3 Análisis de redes a partir de entidades puntuales	18
Figura 4 Estructura general del sistema de información para apoyo a la producción frutícola.	22
Figura 5 Rangos cualitativos	26
Figura 6 Flujo de trabajo del prototipo.	28
Figura 7 1) pantalla de inicio de sesión, 2) pantalla para consulta de datos, y 3) pantalla para registro de nuevas ubicaciones.	29
Figura 8 Interpolación de mediciones de temperatura en el área de estudio	30
Figura 9 Resultados por función.....	32
Figura 10 Resultados por usuario	33

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ANACAFE	Asociación Nacional del Café
CATIE	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
CDRO	Asociación de Cooperación para el Desarrollo Rural de Occidente
CRIA	Consortios Regionales de Investigación Agropecuaria
CUNOC	Centro Universitario de Occidente
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FRUTAGRU	Asociación Fruticultores Agrupados
IICA	Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala
MAGA	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación
SIG	Sistema de Información Geográfica
USAC	Universidad de San Carlos de Guatemala
USDA	The United States Department of Agriculture



RESUMEN

El occidente de Guatemala es una región propicia para el cultivo de frutales deciduos. Aunque la variación climática, particularmente en el valle de Quetzaltenango y Totonicapán, ha causado que los productores enfrenten sus efectos adversos. La información climática es un insumo clave para identificar zonas adecuadas para cultivos, tomar acciones y evitar daños por condiciones extremas como heladas o sequías. Los avances tecnológicos, especialmente en dispositivos móviles nos brindan la capacidad de capturar y procesar datos y distribuir la información generada de forma efectiva para apoyar los procesos de toma de decisiones. Esta investigación tuvo como propósito desarrollar y validar una aplicación para almacenar datos producidos por una red de estaciones climáticas, aplicar geoprocesamiento a estos, derivar parámetros de interés para la producción de frutales y distribuir los resultados por medio de dispositivos móviles a fruticultores. Se respondió la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo a través de un sistema de información agroclimática puede aumentarse la resiliencia de los productores frutícolas al permitirles responder de forma oportuna ante condiciones climáticas adversas? Y como preguntas secundarias: ¿Cómo desarrollar un prototipo del sistema que integre la información agroclimática primordial para el cultivo de frutales caducifolios? ¿Cómo validar el prototipo por medio de una prueba de funcionalidad con el apoyo de los productores frutícolas? Las conclusiones del trabajo fueron: Se desarrolló una aplicación agroclimática web adaptativa, capaz de facilitar el acceso a los datos desde teléfonos inteligentes, tabletas y computadoras personales. El prototipo de sistema fue hospedado en Amazon Web Services, debido a la escalabilidad y reducción de costos y tiempo. El prototipo es capaz de interpolar adecuadamente mediciones de las variables agroclimáticas sobre el área de interés. Los usuarios que evaluaron la funcionalidad indicaron que el prototipo, presenta una navegación simple e intuitiva, el diseño se adapta bien al tamaño de pantalla del dispositivo, posee funciones fáciles de utilizar. La prueba de usabilidad arrojó resultados que indican que el prototipo es “Bueno”, fácil de aprender, intuitivo de utilizar y que a los usuarios les gustaría utilizarlo para sus necesidades de información meteorológica. En cuanto a las recomendaciones: Expandir las capacidades de dicha aplicación para investigadores y académicos. Fortalecer y densificar la red de estaciones. Involucrar al sector académico para una mejora continua del prototipo. Eliminar la burocracia para dar apoyo al desarrollo agrícola del país. Motivar a las asociaciones y Organizaciones No Gubernamentales (ONGs), a unir esfuerzos y datos para fortalecer el prototipo.

ABSTRACT

Western Guatemala is a favourable region for deciduous fruit trees. Although climatic variation, particularly in the Quetzaltenango and Totonicapán valley, has caused producers to face its adverse effects. Climate information is a key input for identifying suitable areas for crops, taking actions, and avoiding damage from extreme conditions such as frost or droughts. Technological advances, especially in mobile devices, give us the ability to capture and process data and distribute the information generated effectively to support decision-making processes. The purpose of this research was to develop and validate an application to store data produced by a network of weather stations, apply geoprocessing to these, derive parameters of interest for fruit production and distribute the results through mobile devices to fruit growers. The following research question was answered: How can the resilience of fruit producers be increased by allowing them to respond in a timely manner to adverse weather conditions through an agroclimatic information system? And as secondary questions: How to develop a prototype of the system that integrates the essential agroclimatic information for the cultivation of deciduous fruit trees? How to validate the prototype through a functionality test with the support of fruit producers? The conclusions of the work were: An adaptive agroclimatic web application was developed, capable of facilitating access to data from smartphones, tablets, and personal computers. The system prototype was hosted on Amazon Web Services, due to scalability and cost and time reduction. The prototype is capable of adequately interpolating measurements of the agroclimatic variables over the area of interest. Users who evaluated the functionality indicated that the prototype presents a simple and intuitive navigation, the design adapts well to the screen size of the device and has easy-to-use functions. The usability test yielded results indicating that the prototype is "Good", easy to learn, intuitive to use, and that users would like to use it for their weather information needs. Regarding the recommendations: Expand the capabilities of this application for researchers and academics. Strengthen and densify the stations network. Involve the academic sector for a continuous improvement on the prototype. Eliminate bureaucracy to support the country's agricultural development. Motivate associations and Non-Governmental Organizations (NGOs) to join forces and data to strengthen the prototype.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

En Guatemala los departamentos de Quetzaltenango, Totonicapán y Chimaltenango, son los principales productores de melocotón con el 50% del área cultivada a nivel nacional. Con la variación climática en el país, y particularmente en el valle de Quetzaltenango y Totonicapán, los productores se enfrentan a una serie de incertidumbres causadas especialmente por los efectos adversos de los elementos del clima (González, I.; Alvarado, 1999).

De acuerdo con el análisis de datos climáticos que realiza Alvarado Quiroa (2001), durante 25 años de registro (del año 1976 a 2000), determina que existe una alta variabilidad anual en la acumulación de horas frío que va de las 429 a las 599 horas, estimadas a través del método de Da Mota. Otro elemento climático analizado es el riesgo a las heladas, que son las responsables de provocar hasta la pérdida total de una cosecha; en este estudio determina que es a partir del 4 de mayo cuando existe el 95% de probabilidades de que ya no ocurra una helada en el rango de entre los 0 °C a -1 °C y del 15 de marzo con la misma probabilidad de una helada en el rango entre los -5.1°C y los -6.0°C. Por otro lado, determinó que existen períodos prolongados con déficit hídrico provocado por la entrada tarde de la época lluviosa o canículas que han alcanzado los 25 días, especialmente durante los meses de julio y agosto.

Alvarado Quiroa, Héctor; García Hernández, Hugo; Alvarado Soto, (2019) en la investigación titulada “Regionalización climática del valle de Quetzaltenango y Totonicapán, para el cultivo de frutales deciduos” analizaron las variables climáticas horas frío, riesgo a heladas, déficit hídrico, pendiente y pisos altitudinales a través de la interpolación de información climática proveniente de cinco estaciones meteorológicas ubicadas en el valle de Quetzaltenango y Totonicapán. El análisis de estas variables climáticas permitió generar un mapa a través de la integración de estas en una matriz de decisión, en el cual se identificaron cuatro regiones climáticas de acuerdo a las condiciones potenciales o restrictivas para el cultivo de frutales deciduos, determinando que: a) el 90% de la producción de caducifolios se enmarca en un rango de acumulación de 401 a 550 horas frío, b) el 46% del área es afectada

por temperaturas críticas que van desde los $-6.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta los $-11.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, estas temperaturas dañan estados fenológicos de los frutales deciduos tales como pétalos visibles en melocotón y caída de pétalos en ciruelas, y c) el área con mayor probabilidad de déficit hídrico se ubica hacia las llanuras al sur del valle de Totonicapán.

Como se mencionó, la anterior investigación permitió generar un mapa de regiones climáticas, la cual le brinda a los fruticultores una orientación en donde establecer una plantación de algún frutal caducifolio, en una parcela en particular, en el área de estudio en función de los requerimientos climáticos de la especie o de la variedad frutícola, tales como, requerimiento de frío, riesgo a heladas y el régimen hídrico.

De lo anterior se puede afirmar que la información climática es un insumo clave en la producción agrícola, tanto para identificar zonas adecuadas para establecer cultivos dependiendo de sus requerimientos climáticos, como para tomar acciones para evitar daños por condiciones extremas tales como heladas o sequías. En este sentido, los avances tecnológicos de las últimas décadas nos permiten contar con la capacidad de producir y procesar datos climáticos, y distribuir la información generada de forma efectiva para apoyar los procesos de toma de decisiones de los productores. En particular, los dispositivos móviles tales como tabletas y teléfonos inteligentes, constituyen medios altamente efectivos para comunicar la información producida a los productores interesados en ella.

De particular interés para esta investigación son los sistemas que utilizan dispositivos móviles para comunicar alertas tempranas. Por ejemplo, Allen-Sader, y otros, (2019) describe un sistema de predicción de brotes de roya en cultivos de trigo, que incluye la generación y comunicación de alertas tempranas a extensionistas y pequeños productores. Las pruebas realizadas (durante las temporadas de producción 2017 y 2018), demuestran que el sistema provee información relevante para priorizar la aplicación de fungicidas, cuya disponibilidad es limitada. Este tipo de sistemas requieren integrar conocimientos de diversos campos, razón por la cual esta investigación es un esfuerzo multidisciplinario que involucra a profesionales en producción agrícola, análisis con sistemas de información geográfica, desarrollo de software y productores.

El uso cotidiano de dispositivos móviles ha tenido un crecimiento sostenido durante los últimos años (*Boletín Estadístico 2do Semestre 2019 – SIT*, n.d.), lo cual hace de las aplicaciones móviles un medio adecuado y directo para alcanzar a los sectores de la población, siendo que los productores agrícolas de Guatemala no son la excepción.

A nivel global, existen esfuerzos relacionados con el uso eficiente de tecnologías de la información y comunicación para alcanzar y dar soporte al sector agrícola, Patel y otros, (2016) por ejemplo realiza un estudio del impacto que han tenido tales aplicaciones en actividades cotidianas como la agricultura, concluyendo que la mayoría de estas tienen la desventaja de presentar información estática; mayores retos de dichas aplicaciones incluyen la disponibilidad de datos actuales e históricos además de los pronósticos, y la interpretación contextualizada de los mismos (Caine y otros, 2015).

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Aunque la investigación de Alvarado Quiroa, Héctor; García Hernández, Hugo; y Alvarado Soto, (2019), puede orientar al fruticultor en donde establecer una plantación frutícola en el área de estudio en función de las variables climáticas mencionadas, esta información es estática y no permite determinar el comportamiento de las mismas en un momento dado, incluyendo alertas tempranas para heladas y déficit hídrico. Por ejemplo, la probabilidad de la ocurrencia de una helada y su magnitud 24 horas antes de que suceda, para que el fruticultor pueda tomar las medidas pertinentes para contrarrestarla, o información sobre la acumulación diaria de horas frío durante el período que permita orientar al productor en qué momento puede realizar prácticas agronómicas para compensar las horas frío, o el comportamiento del régimen hídrico, entre otras.

En este sentido, la presente investigación tuvo como propósito desarrollar y validar una aplicación para almacenar datos producidos por una red de estaciones climáticas, aplicar métodos de geoprocésamiento a estos datos para derivar parámetros de interés para la producción de frutales, y distribuir los resultados por medio de una interfaz para dispositivos móviles a fruticultores del valle de Quetzaltenango y Totonicapán. Con la presente investigación se respondieron a las siguientes preguntas de investigación ¿Cómo a través de un sistema de información agroclimática puede aumentarse la resiliencia de los productores frutícolas al permitirles responder de forma oportuna ante condiciones climáticas adversas? Y como preguntas secundarias las siguientes: ¿Cómo desarrollar un prototipo del sistema que integre la información agroclimática primordial para el cultivo de frutales caducifolios? ¿Cómo validar el prototipo por medio de una prueba de funcionalidad con el apoyo de los productores frutícolas? ¿Cómo validar el prototipo por medio de una prueba de usabilidad con el apoyo de los productores frutícolas?

1.3. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Los requerimientos climáticos para el cultivo de frutales caducifolios, han puesto grandes desafíos a los fruticultores nacionales, particularmente a los del valle de Quetzaltenango y Totonicapán. El determinar qué áreas son las más indicadas para establecer plantaciones de frutales caducifolios, requiere de una recopilación de diferentes variables climáticas, las cuales al entrecruzarlas pueden definir áreas potenciales o restrictivas para la producción de estos frutales. Sin embargo, ubicar un cultivo en un área que ofrece las condiciones climáticas requeridas por el mismo, no es garantía de un proceso de producción libre de condiciones climáticas adversas. Por esta razón, los productores requieren acceso permanente a información oportuna para ajustar sus prácticas agronómicas para enfrentar eventos tales como heladas y sequías y, en general para dar soporte a sus procesos de toma de decisiones a corto y mediano plazo.

Si la información climática es recibida por los fruticultores en el momento oportuno, podrán planificar con anticipación prácticas agronómicas que les permitan reducir el riesgo a los daños provocados por los factores climáticos adversos, tales como el daño por heladas, la reducción del rendimiento por la falta de acumulación de horas frío o determinar los períodos de déficit hídrico para la aplicación de riego suplementario a la precipitación pluvial. La distribución de datos climáticos recopilados a través de siete estaciones ubicadas en el área de estudio, y de información derivada de estos, será un factor importante para contribuir a incrementar la resiliencia de los productores frutícolas del valle de Quetzaltenango y Totonicapán ante los impactos del cambio climático.

Otra ventaja de la distribución de información climática a través de dispositivos móviles es que permitirá orientar al productor en la diversificación de especies y sus variedades de frutales deciduos, lo que trae consigo nuevas oportunidades de comercialización para los productores de la zona, ya que se estaría ampliando la diversificación de la oferta y la ventana de mercado. Además, la información climática distribuida a través de dispositivos móviles puede ser utilizada por otros productores de la zona tales como productores de hortalizas y tubérculos, ya sea al aire libre o bajo condiciones controladas. Por esta razón, una aplicación para dispositivos móviles debe ofrecer información climática y alertas tempranas específicas con base en los requerimientos climáticos del cultivo seleccionado por el productor.

Por tanto, en base a los resultados de la investigación desarrollada por Alvarado Quiroa, García Hernández, y Alvarado Soto, titulada Regionalización climática del valle de Quetzaltenango y Totonicapán, para el cultivo de frutales deciduos (2019), entre los cuales se encuentran los medios de captura de datos a través de las estaciones meteorológicas instaladas, la estación base como medio de almacenamiento y los métodos geo-estadísticos propuestos en ella; el presente trabajo constituye la extensión lógica para la construcción de un sistema de información agroclimática, que consiste en desarrollar un medio efectivo para la distribución de los resultados de modo que los mismos alcancen directamente a los productores locales y les provean de la información que, también en base al estudio anterior, ellos requieren para aumentar su capacidad de respuesta a los problemas causados por fenómenos naturales propios de la región.

1.4. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

Un sistema de información agroclimática aumenta la resiliencia de los productores frutícolas al permitirles responder de forma oportuna ante condiciones climáticas adversas.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. General

Desarrollar un sistema de información agroclimática accesible por medio de dispositivos móviles que permita aumentar la resiliencia de los productores frutícolas del valle de Quetzaltenango y Totonicapán ante los impactos del cambio climático.

1.5.2. Específicos

- a. Desarrollar un prototipo del sistema que integre la información agroclimática primordial para el cultivo de frutales caducifolios.
- b. Validar el prototipo por medio de una prueba de funcionalidad con el apoyo de los productores frutícolas.
- c. Validar el prototipo por medio de una prueba de usabilidad con el apoyo de los productores frutícolas.



II. MARCO TEÓRICO

2.1. LOS FRUTALES CADUCIFOLIOS Y SUS REQUERIMIENTOS CLIMÁTICOS

2.1.1. Frutales caducifolios, deciduos o de hoja caduca

Son árboles propios de regiones frías y templadas, aun cuando su cultivo se ha extendido a regiones subtropicales, cultivándose en áreas de gran altitud, en las que se presentan bajas temperaturas en invierno. Presentan un ciclo anual de desarrollo muy típico, caracterizado por una intensa floración en primavera, seguida de una foliación y el crecimiento vegetativo, que dura aproximadamente de 7 a 8 meses, al cabo de los cuales queda inhibido el crecimiento y se detiene; poco tiempo después se desprenden todas las hojas, mediante abscisión del pecíolo, quedando totalmente desnudos y comenzando un período de reposo o inactividad casi total. Este desprendimiento total de las hojas, así como el período de reposo, son las características que definen a este tipo de árboles, ya que la caída de las hojas no obedece a la presencia de un estado de senescencia en ellas, sino ocurre en un lapso reducido y sucediendo en la totalidad de ellas, sin importar la edad o etapa de desarrollo de las mismas (Westwood, 2009).

2.1.2. Problemas de la Fruticultura de caducifolios en regiones subtropicales.

En regiones tropicales la ausencia del período de reposo y su rompimiento es el principal factor limitante, lo que provoca una constante pero disminuida vegetación durante todo el año, con la presencia de flores y de frutos en distintos estados de desarrollo, que nunca llegan a alcanzar la calidad deseada. Durante el invierno, solamente se desprenden las hojas de mayor edad, persistiendo las más jóvenes, en las extremidades de los brotes, los cuales no detienen su crecimiento. La ramificación lateral suele presentarse deficientemente, debido a la dominancia apical, quedando las ramas alargadas, vacías y prácticamente improductivas (Alvarado Quiroa, 2001).

La fruticultura de hoja caduca en las regiones subtropicales se practica en zonas de gran altitud, en las que, aun existiendo ciertos inviernos, éstos no son tan severos, constantes y prolongados, como sería lo deseable, por lo que los árboles se manifiestan a través de reposos prolongados y defoliación tardía, los cuales hay necesidad de controlar (Alvarado Q., 2001).

De acuerdo con Alvarado Q., (2001) entre los principales problemas del establecimiento de frutales deciduos, en las partes altas de las regiones subtropicales, que, por supuesto incluye Guatemala, están:

- Falta de temperaturas suficientemente elevadas durante el período de vegetación y el de maduración de los frutos.
- Ciclos estacionales apropiados a la vegetación y fructificación demasiados cortos, insuficientes para muchos frutales.
- Falta de luminosidad y de intensidad de la radiación solar, debido a la presencia de nubosidad, durante el período de crecimiento y el de maduración de la fruta.
- Presencia de lluvias en la época de maduración de los frutos.
- Presencia frecuente de heladas tempranas y tardías que restringen la longitud del ciclo vegetativo.
- Presencia de granizo, lluvias y viento en forma tempestuosa.

Los anteriores problemas contribuyen a la determinación de la mala calidad y bajos rendimientos en el cultivo de frutales deciduos, tales como sus características de forma, tamaño, color, aroma y sabor. Siendo por otra parte atacadas por enfermedades fúngicas, fisiológicas e insectos lo que contribuye todavía más a restarles valor comercial (Alvarado Q., 2001).

2.1.3. El período de reposo en los frutales caducifolios

La detención del crecimiento, la caída de las hojas y la presencia de un período de reposo, es originada por causas todavía no bien conocidas. En la actualidad es aceptado por la mayor parte de los fisiólogos, que el mecanismo directo que regula estos procesos internos es un balance o contenido proporcional, en el interior del vegetal, de promotores de crecimiento y de inhibidores. Lo anterior no constituye un hecho sencillo, ya que son muchas las sustancias de ambos tipos que sintetiza el árbol, cada una de efectos especiales, de actuación específica en ambos procesos y variando sus efectos con las dosis en que estén presentes. Por otra parte, la acción de estas sustancias depende mucho de la presencia de otras y de las interrelaciones que entre ellas se puedan presentar. Los factores externos del árbol, en especial los climáticos, influyen de manera notable, sobre la fisiología de éste dictándole instrucciones sobre la síntesis de sustancias promotoras o inhibidoras. Cuando las cantidades de promotoras son altas, los árboles son inducidos a crecer, mientras si la predominancia es de inhibidores se induce el descanso. Ambos tipos de sustancias suelen ser producidos en las hojas y en las yemas, y a partir de estos órganos se produce la difusión hacia otros, donde son resentedos los efectos (Westwood, 2009).

2.1.4. El papel de la temperatura en los frutales caducifolios

La temperatura es uno de los principales elementos del clima, que influye directamente en la actividad fisiológica del árbol deciduo y en la calidad y rendimiento de las cosechas. El efecto de la temperatura sobre los frutales deciduos, puede ser estudiado desde varios puntos de vista: horas frío o sea la acumulación de frío durante el invierno, para que los árboles llenen sus requerimientos, durante su período de reposo; a la incidencia de heladas, especialmente las de primavera (tardías) y al calor durante el verano, que es cuando ocurre el desarrollo y maduración de la fruta (Alvarado Quiroa, 2001).

a. La necesidad de frío invernal

La presencia de bajas temperaturas, es necesaria para los frutales caducifolios durante su época de reposo, para que por medio de ellas puedan romper ese período de detención de actividades. Las bajas temperaturas, hacen que las causas que motivaron el letargo desaparezcan y los árboles broten y reinician un nuevo ciclo de crecimiento, al presentar temperaturas favorables en la siguiente primavera. El rompimiento del estado de reposo, es función de la presencia de frío invernal, que actúa destruyendo a las sustancias inhibitoras y favoreciendo el incremento de los promotores (Calderon Alcazar, 1993). Para que el balance inhibitor-promotor se lleve a cabo en forma conveniente, se rompa el reposo y los árboles florezcan y entren en actividad en la primavera, se necesita la presencia de una cierta cantidad de bajas temperaturas en invierno, que se conoce como requerimiento de frío. Estos requerimientos de frío son propios para cada especie y de cada variedad en particular, variando notablemente dentro de una misma especie (Alvarado Quiroa, 2001).

b. El valor del concepto de horas frío

Los requerimientos de frío se miden o se expresan comúnmente por el término “horas frío” (hf), siendo una hora frío, el lapso de esa duración de tiempo transcurrido a una temperatura de 7.2 °C o menos. Es decir, todo el tiempo en que durante el reposo invernal esté expuesto el árbol a temperaturas de 7.2 °C o menos, puede sumarse y expresarse el total obtenido en horas. Para el dato total de horas frío pueden sumarse pequeños lapsos, menores a esa unidad, o grandes lapsos continuos que impliquen temperaturas bajas, de acuerdo al índice expresado, de gran duración, con un gran número de horas en esa situación (Calderón Alcazar, 1993).

Los factores ecológicos que se consideran que interfieren en la cuantificación de las horas frío, en las regiones subtropicales, son los siguientes: alta oscilación diaria, diurna-nocturna de la temperatura; irregularidad estacional en la presencia de bajas temperaturas; presencia de épocas definidas de gran calor durante el invierno; gran radiación solar y ausencia de nubosidad; reducida humedad ambiente y edáfica; presencia de vientos cálidos; fotoperiodismo correspondiente a baja latitud (Calderón Alcaraz, 1993).

c. Las unidades frío

Las temperaturas más elevadas de 7.2 °C, pero cercanas a ella, tienen algún valor como efecto del frío invernal sobre los frutales y ese valor debe ser diferencial. Existe un criterio para medir, expresar y calcular los requerimientos de frío: las unidades frío (Calderon Alcazar, 1993). Este concepto, determina que, a determinados rangos de temperatura, el efecto de cada hora expuesta, tiene un valor de una unidad frío, incluyendo dentro de estos rangos a las temperaturas comprendidas entre 2.5 °C y 9.1 °C. Una unidad de frío se considera como la acumulación de frío que tiene lugar durante una hora en la que la temperatura es de 7.0 °C, sin embargo, se da igual valor a las temperaturas comprendidas entre los rangos citados (Alvarado Q., 2001) (**ver cuadro 1**).

Cuadro 1. Valor de las temperaturas para cálculo de unidades frío.

TEMPERATURA	UNIDADES FRÍO
Menor de 1.4 °C	0
De 1.5 °C a 2.4 °C	0.5
De 2.5 °C a 9.1 °C	1.0
De 9.2 °C a 12.4 °C	0.5
De 12.5 °C a 15.9 °C	0
De 16.0 °C a 18.0 °C	-0.5
Mayor de 18 °C	-1.0

FUENTE: Richardson et al. 1974, citado por (Calderón Alcaraz, 1993)

De acuerdo al modelo de Richardson, citado por Calderón (1993) las unidades frío deben comenzarse a cuantificar desde el otoño, a partir del día en que exista la más elevada contribución positiva, debiendo ser suspendido el registro a finales de invierno, cuando de manera normal las unidades frío que cada día se obtienen son negativas.

d. Las heladas

Desde el punto de vista meteorológico, se considera que se ha producido una helada, cuando la temperatura del aire dentro de la casilla meteorológica (ubicada a 1.50 m de altura), ha descendido por debajo de 0 °C. Por otro lado, si tenemos en cuenta el criterio agro meteorológico, se considera que se produce una helada cuando la temperatura ha disminuido lo suficiente, al punto tal, que produce daños en los órganos vegetales (Calderón Alcaraz, 1993).

Las heladas tienen efectos perjudiciales sobre los vegetales, principalmente cuando estos se encuentran en período activo de crecimiento, teniendo mucha importancia su estado fisiológico para su susceptibilidad al daño. Durante el período de reposo, los frutales deciduos son muy resistentes a los descensos de temperatura, sin embargo, si estos son muy intensos y prolongados pueden dañar a cualquier parte del árbol, no importando su edad y causar su muerte (Alvarado Quiroa, 2001).

Las células parenquimatosas suculentas expuestas a temperaturas debajo de 0 °C mueren en poco tiempo debido a la combinación de varios efectos nocivos de acción más o menos simultánea, como son congelamiento de líquidos internos, deshidratación y daños de tipo mecánico. Las heladas causan la congelación y la formación de cristales de los líquidos intra e intercelulares. La congelación del agua en los espacios intercelulares determina una salida de agua de la célula hacia el exterior, con lo cual ésta se deshidrata en cierto grado y tiende a plasmolizarse (Calderón Alcaraz, 1993).

El estado fisiológico de la planta o del órgano en el momento de la helada, determina en gran parte el daño que se pueda sufrir. Durante la época de reposo, las condiciones de resistencia del árbol están muy desarrolladas y éste suele ser casi inmune a las bajas temperaturas. En estado total de reposo, las yemas pueden soportar sin ningún riesgo, temperaturas más o menos prolongadas del orden de los -5 °C a -8 °C. Sin embargo, temperaturas de -1.1 °C en la etapa fenológica de cuajado de fruta en melocotón ya provoca muerte del tejido en referencia, al reducirse a los -2.5 °C provoca el 10% de muerte y al descender a los -3.9 °C hasta el 90%. (Westwood, 2009).

2.1.5. Precipitación pluvial

La lluvia que cae sobre el terreno se dispersa de varios modos: Una parte es retenida temporalmente por el suelo y luego evaporada a la atmósfera o absorbida por plantas y luego transpirada; otra parte del agua precipitada escurre sobre la superficie del

suelo hasta llegar a arroyos o ríos; una más penetra al terreno y pasa a formar parte de los acuíferos subterráneos, los cuales eventualmente desembocan en los océanos, afloran espontáneamente o son explotados por el hombre (Calderón Alcaraz, 1993).

Durante la época de floración y maduración, las lluvias abundantes pueden ocasionar la caída del polen, afectando la fecundación; alarga el período vegetativo y exponiendo al cultivo al ataque especialmente de enfermedades fungosas. La influencia de la lluvia como suministro de agua para las plantas, normalmente es benéfica, existiendo casos excepcionales en que es perjudicial. Los períodos en que un cultivo está sujeto a tensiones hídricas severas, afectan no sólo en forma cuantitativa, sino también en forma cualitativa el rendimiento; durante el desarrollo del cultivo existen períodos críticos, en los cuales una alta tensión de la humedad del suelo puede reducir significativamente el rendimiento (Castro Loarca, 1996).

2.2. GEOPROCESAMIENTO

Denominado también análisis de geo datos, se define como la ejecución metódica de una secuencia de operaciones en los datos geográficos para crear nueva información (Falla Gamboa, 2020).

Las capas vectoriales contienen una parte de información geométrica (las entidades) y otra de carácter no geométrico (los atributos asociados). En donde a través de operaciones geométricas pueden modificarse, combinarse y analizarse esas geometrías (Olaya, 2009).

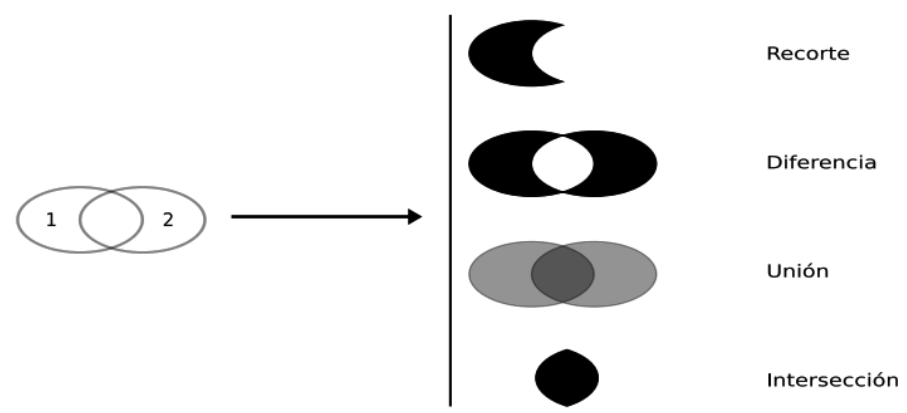
Dentro de las operaciones de geo procesamiento podemos resaltar las siguientes:

2.2.1. Operaciones de Superposición

Estas operaciones permiten generar nuevas capas vectoriales a partir del cruce de dos de ella, pudiendo dichas capas de origen contener distintos tipos de entidades, aunque principalmente regiones (polígonos). Se aplican operaciones lógicas sobre las capas de entrada para generar los resultados. Estas operaciones de tipo booleano (verdadero/falso), son las que definen cada una de las operaciones de solapé o superposición.

En ellas encontramos procedimientos de recorte, diferencia, intersección y unión. Estas operaciones pueden entenderse como operaciones de conjuntos y visualizarse mediante sencillos diagramas (Olaya, 2009).

Figura 1 Tipo de operaciones de traslape entre dos elementos individuales.

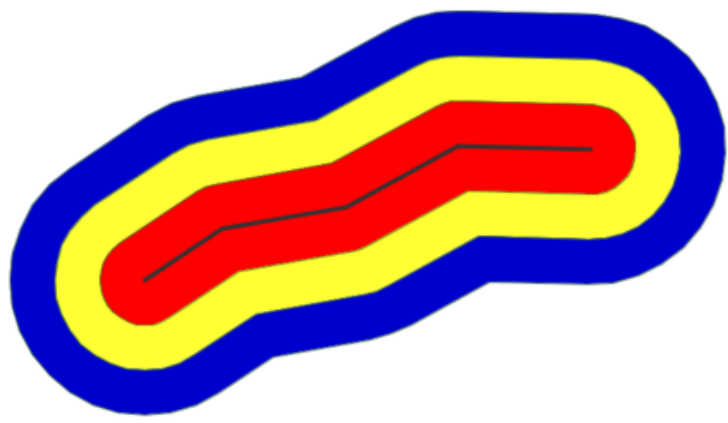


Fuente: (Olaya, 2009)

2.2.2. Operaciones de Proximidad

Dentro de ellas tenemos a los polígonos de Thiessen, punto en polígono, aquí podemos resaltar las áreas de influencia, la cual puede llevarse con entidades de punto, línea o polígono y su resultado siempre es una nueva capa de polígonos. Las áreas cubiertas por estos polígonos reflejan las zonas de influencia de cada entidad. Puede verse también de forma inversa, como una influencia recibida, de tal modo que todos los elementos dentro de la zona de influencia afectan a la entidad que la genera (Olaya, 2009).

Figura 2 Zonas de influencia concéntricas a partir de una entidad lineal

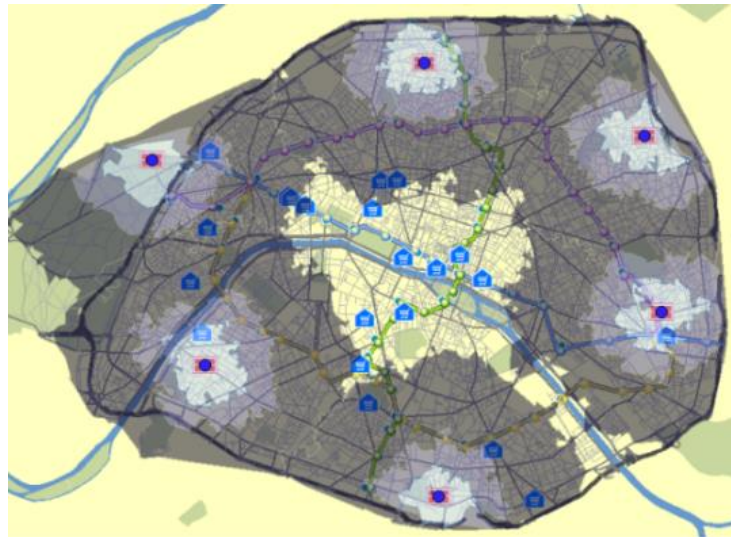


Fuente: (Olaya, 2009)

2.2.3. Operaciones de conectividad

Caracterización de polígonos basados en su área y forma (e.g. tamaño y distancia de semieje menor y mayor). Análisis de redes (e.g. optimización de rutas, asignación de recursos, predicciones de flujo en una ruta) (Falla Gamboa, 2020).

Figura 3 Análisis de redes a partir de entidades puntuales



Fuente: Esri

2.3. DESARROLLO DE SISTEMAS AGROCLIMÁTICOS

El diseño y desarrollo de sistemas de información es una disciplina que trata de organizar el proceso de búsqueda de la solución óptima a un problema particular, dado en el contexto propio de cierta organización, en base a métodos de análisis, de tal modo que el tiempo y recursos a utilizar puedan ser cuantificados y previstos al detalle. La base de dicho proceso es el denominado Ciclo de Vida Clásico de un Sistema de Información (Kendall, 2005a), el cual consiste básicamente de las siguientes fases: análisis y definición de requerimientos, diseño del sistema, desarrollo y pruebas, implementación y mantenimiento del sistema de información.

Tales fases se organizan de distintas maneras, en función de la naturaleza del proyecto, tales variaciones son denominadas Paradigmas de Diseño y Desarrollo del Sistema, estos se pueden dividir en: tradicionales, evolutivos, orientados a objetos,

entre otros y de los cuales surgen como una evolución debida en gran parte a la irrupción del internet (Zumba Gamboa, 2018), los modelos ágiles, enfocados en la adaptación rápida a los cambios y una mayor interacción con los usuarios.

Por otra parte, la agroclimatología surge de la necesaria combinación de la agricultura con el estudio de los fenómenos naturales relacionados al clima (Hernández Navarro, 2017) ya que éste es factor crítico, que tiene una influencia directa en la calidad de las cosechas. Entre los objetivos descritos en el citado estudio, destaca el de “optimizar la toma de decisiones en la planificación agrícola” mediante la canalización de la información generada a agricultores y organismos involucrados.

De tal manera que, el diseño de un sistema de información agroclimática debe ser guiado por los métodos formales enfocados en los sistemas de información en general, dada la trascendencia del mismo, señalada por los autores, en los niveles local y regional, así como su valor en la planificación estratégica.

Un ejemplo de los ya mencionados sistemas de información agroclimática, es el desarrollado por RUIZ CORRAL y otros, (2018) que describe la construcción de una base de datos agroclimáticos del período 1961-2010, su depuración e interpolaciones geográficas para obtención de un conjunto de imágenes ráster con información mensual de variables agroclimáticas para los productores de México y Centroamérica.

De la misma manera, se puede mencionar el trabajo realizado por Rodríguez Roa, (2019) consistente en un sistema de alertas agroclimáticas para una especie de chinche que afecta a los pastizales de la sabana de Bogotá; donde a partir del análisis del comportamiento del insecto, definido por datos de una estación meteorológica y usando un modelo de regresión lineal múltiple se obtuvo la respuesta de variables como la temperatura, precipitación y evapotranspiración, a las fluctuaciones debidas al cambio climático modeladas para el período 2020-2030.



III. MARCO METODOLÓGICO

3.1. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

Con base en la naturaleza de la investigación planteada, la cual busca mejorar los procesos de producción frutícola por medio de un sistema de información, esta investigación se clasifica como tecnológica aplicada.

Respecto a la creación de un sistema de información con una aplicación para dispositivos móviles como herramienta principal de distribución de datos geoprocesados, se seguirá el paradigma de diseño denominado “ciclo de vida clásico de un sistema de información”, el cual tiene como principales fases: la investigación preliminar para la definición de los requerimientos del sistema, el análisis, diseño y desarrollo de un prototipo, con sus correspondientes validaciones como se describe en Kendall (2005).

3.2. CONTEXTO ESPACIAL Y TEMPORAL

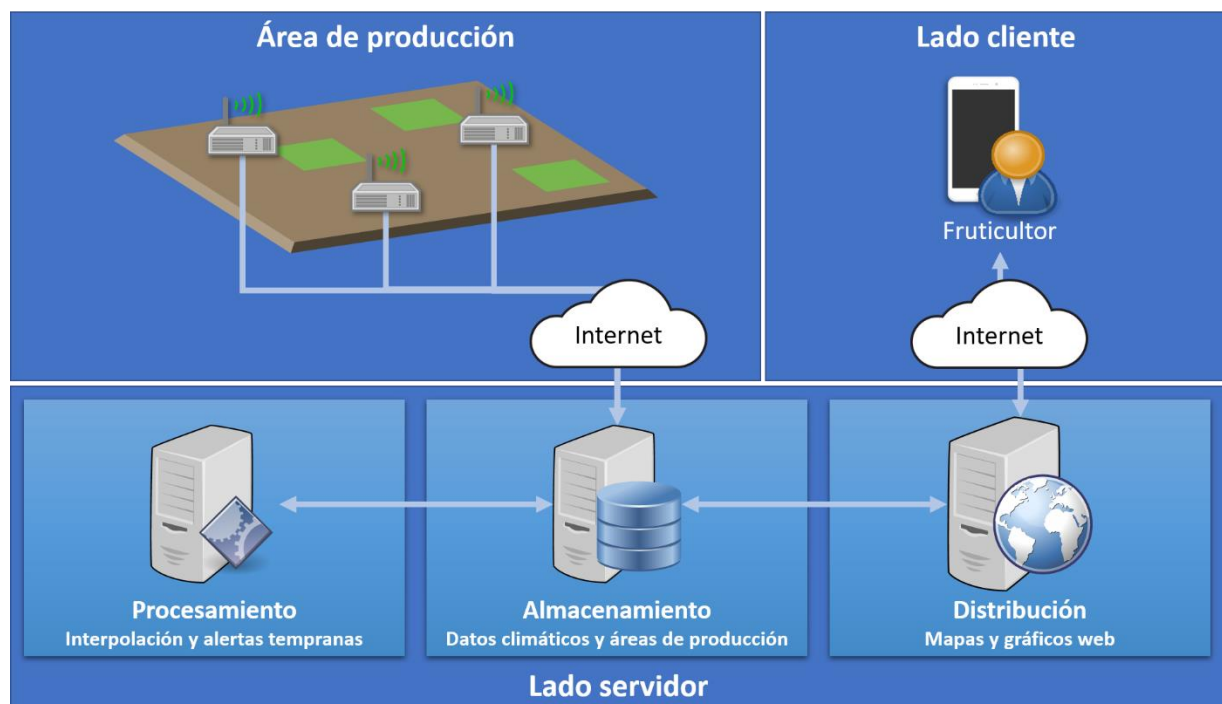
La investigación se realizó en los municipios de: Quetzaltenango, La Esperanza, Salcajá y Cantel del departamento de Quetzaltenango, San Cristóbal Totonicapán, parte sur del municipio de Totonicapán, y la parte occidental del municipio de San Francisco el Alto, del departamento de Totonicapán. En cuanto al contexto temporal, la investigación se dividió en dos momentos importantes: primero, el análisis de requerimientos, diseño y desarrollo del prototipo, actividades que se desarrollaron en el mes de octubre de 2020; y segundo, la prueba de funcionalidad y usabilidad que se desarrolló en los meses de noviembre de 2020 a octubre de 2021.

3.3. FASES DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación se realizó en cuatro fases: análisis de requerimientos, diseño, desarrollo, y evaluación. Estas fases corresponden al ciclo de desarrollo de un sistema de información, sin embargo, no se contemplan las fases de implementación y mantenimiento, esto se debe a que el producto de la investigación será un prototipo, y que la puesta en marcha del sistema validado esta fuera del alcance de la presente investigación.

Basado en el conocimiento que poseen los investigadores sobre los procesos de producción frutícola y desarrollo de sistemas de información, se contaba desde el inicio del proyecto con una visión general del sistema resultante esperado, esta visión se ilustra en la **Figura 4**. En la figura se puede observar que el sistema cuenta con componentes en tres ámbitos diferentes: área de estudio, lado servidor, y lado cliente. El área de estudio es el espacio físico en el cual se ubican las parcelas de producción frutícola, y las estaciones meteorológicas, siendo este el ámbito en el cual se generan los datos del sistema. El lado servidor es un ámbito conceptual en el que se ubican los servidores encargados de almacenar los datos, transformarlos en información, y distribuir los resultados a los productores. Este es un ámbito conceptual dado que, dependiendo de la infraestructura de información y comunicación utilizada, es posible que la ubicación física de los servidores sea desconocida, por ejemplo, al utilizar servicios de infraestructura en la nube. Finalmente, el lado cliente es el ámbito en el que los productores hacen uso del sistema por medio de dispositivos móviles.

Figura 4 Estructura general del sistema de información para apoyo a la producción frutícola.



Fuente: Elaboración propia

3.3.1. Fase de análisis de requerimientos

El análisis de sistemas consistió en “definir el problema, identificar sus causas, especificar la solución e identificar los requerimientos de información que debe cumplir una solución de sistemas” (Laudon & Laudon, 2012). En esta investigación, el problema es la poca capacidad de los fruticultores para responder ante condiciones meteorológicas adversas, causada por la falta de acceso a información meteorológica oportuna, y fue en esta fase donde especificamos una solución a las necesidades de información de los productores en forma de sistema de información agroclimática.

El análisis de requerimientos de información se realizó en la investigación titulada “Regionalización climática del Valle de Quetzaltenango y Totonicapán, para el cultivo de frutales caducifolios” (Alvarado Quiroa, García Hernández, & Alvarado Soto, 2019), esto permitió reducir el tiempo necesario para la ejecución de esta fase. Inicialmente, se realizó una revisión y sistematización de estos requerimientos aprovechando la experiencia de más de 25 años de uno de los investigadores en la producción frutícola en el área de estudio. Luego, estos fueron validados y extendidos en colaboración con personas con conocimiento y experiencia en producción agrícola, quienes también apoyaron la investigación utilizando el sistema en la fase de evaluación. Involucrar a participantes con dichos conocimientos en esta fase permitió obtener una lista de requerimientos apegados a la realidad en la que se desarrollan las actividades de producción frutícola. En esta fase es común analizar sistemas existentes, sin embargo, en algunas ocasiones no existe un sistema de referencia, como en el caso de esta investigación.

3.3.2. Fase de diseño

El diseño del sistema “es el plan o modelo general para ese sistema” (Laudon & Laudon, 2012). Esto incluyó diversos elementos entre los cuales podemos mencionar: salidas, entradas, interfaz de usuario, base de datos, y procesamientos. La relación entre las dos fases mencionadas hasta ahora se puede describir de la siguiente manera: en la fase de análisis, se define que debe hacer el sistema, y en la fase de diseño, se define cómo lo hará. Con base en lo anterior, se hace necesario resaltar la importancia de que el resultado de esta fase definida de forma objetiva cómo satisfacer cada uno de los requerimientos identificados.

En esta fase se prestó especial atención en diseñar una interfaz simple y fácil de utilizar, esto es importante debido a dos razones: primero, facilitó el proceso de entrenamiento de los participantes que probaron el prototipo en la fase de evaluación; Segundo, aumentó la probabilidad de que los participantes deseen continuar apoyando el proyecto luego de finalizada la investigación, y lograr la adopción de un sistema agroclimático basado en los resultados de esta investigación.

3.3.3. Fase de desarrollo

El desarrollo del sistema es la fase en la que “las especificaciones del sistema que se prepararon durante la etapa de diseño se traducen en código de programa” (Laudon & Laudon, 2012). En esta investigación, se desarrolló un prototipo del sistema propuesto, específicamente, un prototipo de características selectas. Este tipo de prototipo permite enfocarse en desarrollar un software que sólo incluye algunas de las características esenciales del sistema, y agregar otras características en iteraciones de desarrollo posteriores (Kendall, 2005a). Este método de desarrollo permitió tener un prototipo funcional con las características esenciales en un tiempo corto, lo que permitió de forma temprana realizar pruebas y correcciones, y esto facilitó una adecuada preparación del prototipo antes de pasar a la fase de evaluación.

Con base en el interés de proporcionar acceso a los datos desde dispositivos móviles, el desarrollo podía producir una aplicación nativa o una aplicación web adaptativa (traducción al español que refleja la semántica de *responsive web app*). La segunda opción fue la más conveniente para esta investigación, debido a que tiene la ventaja de ser independiente del sistema operativo, y también de poder proporcionar una interfaz capaz de adaptarse a diversos dispositivos tales como teléfonos inteligentes, tabletas, y computadoras personales (tanto portátiles como de escritorio), pero se debe mencionar que tiene la desventaja de ofrecer un menor rendimiento frente a una aplicación nativa. Debido a que el sistema no requiere realizar ningún proceso en el dispositivo móvil que requiera alto rendimiento, se decidió desarrollar una aplicación móvil adaptativa.

3.3.4. Fase de evaluación

En esta fase se realizó una prueba de funcionalidad y usabilidad. La primera permitió evaluar si el prototipo satisface los requerimientos para la distribución de información meteorológica identificados en la fase de análisis, y la segunda si el prototipo puede ser usado por los usuarios para obtener dicha información de forma conveniente. El número ideal de participantes para este tipo de estudio es aún un tema de discusión en la comunidad de investigadores sobre usabilidad, sin embargo, la literatura indica que entre 5 y 10 participantes es suficiente para el descubrimiento de problemas (Macefield, 2009; Six & Macefield, 2016).

La prueba de funcionalidad se realizó por medio de una fase de entrenamiento y una de uso independiente del prototipo. En ambas fases, para evaluar que las funciones ofrecidas por el prototipo satisfacen los requerimientos identificados durante el análisis y que estas son fáciles de utilizar, se pidió a los participantes evaluar la dificultad de

uso de las diversas funciones del prototipo e identificar si existen omisiones con relación a los requerimientos. En el Anexo A, Sección 1 se incluye el formulario para evaluar la funcionalidad del prototipo.

La prueba de usabilidad se realizó utilizando el método escala de usabilidad del sistema (SUS por sus siglas en inglés) (Brooke, 1986). El SUS es un cuestionario corto que consiste en diez enunciados acerca del sistema siendo evaluado. El cuestionario fue diseñado originalmente en inglés, pero ha sido utilizado exitosamente en diversos idiomas (Brooke, 2013), debido a que no existe una versión oficial en español, se utilizó una traducción realizada por los autores (ver Anexo A, Sección 2). En el cuestionario, los enunciados impares son positivos y los pares son negativos, esta alternación busca evitar sesgo en las respuestas (Brooke, 2013). Los sujetos de prueba calificaron cada enunciado en una escala de Likert con los valores: totalmente en desacuerdo, en desacuerdo, neutral, de acuerdo, y totalmente de acuerdo. Estos valores corresponden a los valores numéricos 1 a 5, y se agregan de la siguiente forma:

1. Calcular la contribución por enunciado, para los enunciados impares, la contribución es el valor dado por el usuario (entre 1 y 5) menos 1, y para los pares, 5 menos el valor dato por el usuario.
2. Sumar las contribuciones individuales, lo que dará un resultado entre 0 y 40.
3. Convertir el valor al rango 0 a 100, esto se logra multiplicando por 2.5, el resultado es la calificación de usabilidad.

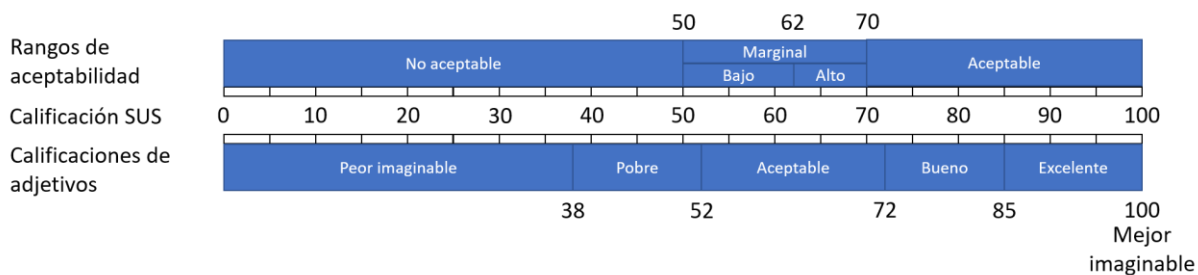
Dado el método para calcular la calificación por usuario, el mejor resultado posible se obtiene cuando el usuario de prueba está “totalmente de acuerdo” con los enunciados impares, y “totalmente en desacuerdo” con los enunciados pares, el **cuadro 2** muestra los diferentes valores de la escala y su contribución a la calificación de usabilidad. Para agregar las calificaciones otorgadas por múltiples usuarios se utiliza promedio simple.

Cuadro 2 Contribución a la calificación de usabilidad.

		Enunciado impar	Enunciado par
	Valor	Contribución $Valor - 1$	Contribución $5 - Valor$
Totalmente en desacuerdo	1	0	4
En desacuerdo	2	1	3
Neutral	3	2	2
De acuerdo	4	3	1
Totalmente de acuerdo	5	4	0

Las calificaciones de usabilidad pueden interpretarse en varios rangos cualitativos, los cuales fueron diseñados con base a experimentación empírica (Bangor et al., 2009), la **Figura 5** muestra dos ejemplos de estos rangos.

Figura 5 Rangos cualitativos



Fuente: Elaboración propia

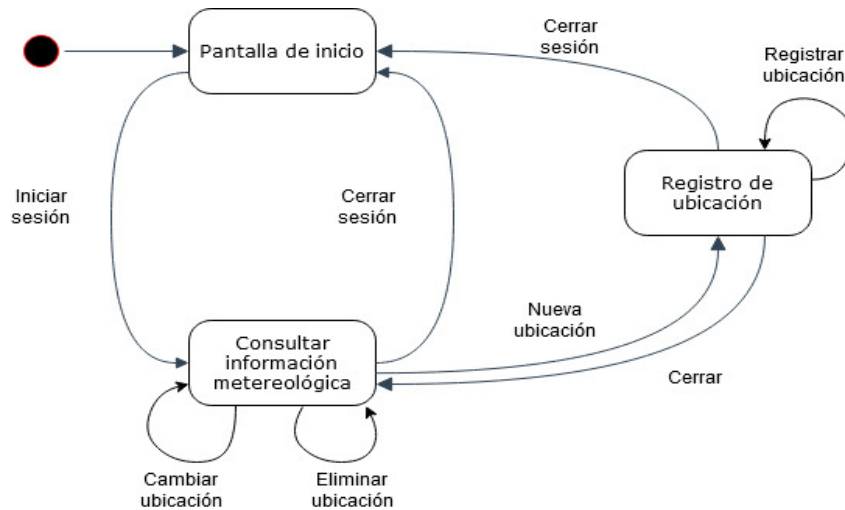
IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La fase de análisis identificó cuatro requerimientos que el sistema de distribución de información meteorológica debe cumplir para satisfacer la necesidad de información de los productores. Estos requerimientos son:

1. **Registro de ubicaciones de interés:** la red de estaciones registra observaciones de las condiciones meteorológicas en los puntos en los cuales las estaciones están instaladas, sin embargo, los productores requieren datos en ubicaciones de interés específicas, por ejemplo, un área de producción de frutales. Para satisfacer esta necesidad, el sistema debe ser capaz de interpolar las mediciones de las variables sobre el área de interés, y permitir al usuario seleccionar los puntos de los cuales desea obtener información meteorológica.
2. **Consulta de variables meteorológicas:** los productores requieren obtener valores para diversos parámetros meteorológicos en las ubicaciones de interés, en particular es relevante poder consultar los valores de las últimas 24 horas, y predicción de las siguientes 24 horas. Estos valores deben consultarse de forma descriptiva, incluyendo el nombre del parámetro, valor y unidad de medida.
3. **Visualizar la evolución temporal de variables meteorológicas:** dado que los parámetros meteorológicos varían con respecto al tiempo, es importante para los productores poder visualizar de forma gráfica la evolución de los parámetros en los últimos 30 días, y la predicción de los próximos 1 a 3 días.
4. **Descargar series temporales de variables meteorológicas:** en general, se espera que el sistema incluya opciones simples para consulta de datos. Sin embargo, existen casos en que los productores requieren análisis específicos de los datos. Por ello es necesario que el sistema permita descargar series temporales de los datos meteorológicos para procesamiento fuera del sistema.

Debido a que el prototipo sería utilizado por usuarios con diversos niveles de dominio en el uso de tecnología, en la fase de diseño se definió el flujo de trabajo del prototipo web priorizando una navegación simple e intuitiva. La **Figura 6** ilustra el flujo de trabajo utilizando una Máquina de Estados Finitos. Este flujo de trabajo fue utilizado como guía al diseñar las pantallas del prototipo, y para explicar el funcionamiento del sistema a los usuarios de prueba. Este flujo incluye dos estados que permiten satisfacer los cuatro requerimientos indicados anteriormente: registro de ubicación y consultar información meteorológica. El primer estado, satisface el requerimiento de “Registro de ubicaciones de interés”, y el segundo estado satisface los tres requerimientos restantes, “Consulta de variables meteorológicas”, “Visualizar la evolución temporal de variables meteorológicas”, y “Descargar series temporales de variables meteorológicas”.

Figura 6 Flujo de trabajo del prototipo.



Fuente: Elaboración propia

Una vez definido el flujo de trabajo, se diseñaron y desarrollaron las pantallas del prototipo de la aplicación web. La **Figura 7** muestra dichas pantallas en un dispositivo móvil. Dado que los usuarios objetivo pueden utilizar diversos dispositivos para trabajar con el prototipo, la aplicación web es adaptativa, es decir que el diseño se adapta al tamaño de pantalla del dispositivo en uso.

El desarrollo de la interfaz del prototipo (front-end) se realizó utilizando HTML, CSS y JavaScript. Específicamente, se utilizaron las siguientes librerías:

- **Bootstrap**⁵ para la estructura general de la interfaz de la aplicación. Además, esta librería proporciona herramientas específicas para el desarrollo de aplicaciones adaptativas.
- **jQuery**⁶ para modificar en tiempo de ejecución los elementos de la interfaz (modificar el Document Object Model - DOM).
- **jqWidgets**⁷ para los controles de la interfaz, incluyendo botones, listas, y campos de texto.
- **Leaflet**⁸ para visualizar información geográfica en forma de mapas.
- **Chart.js**⁹ para visualizar información descriptiva en forma gráfica.

⁵ <https://getbootstrap.com/>

⁶ <https://jquery.com/>

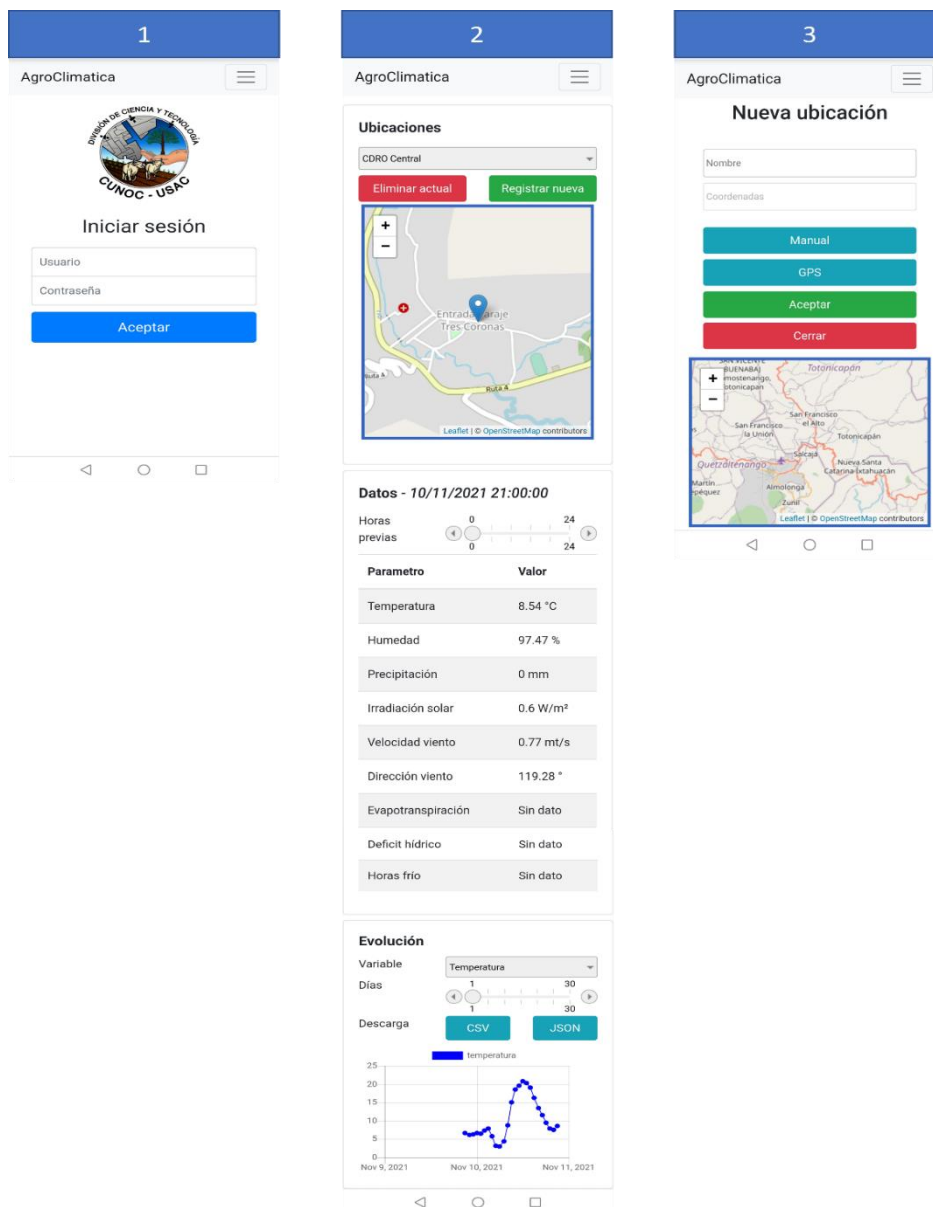
⁷ <https://www.jqwidgets.com/>

⁸ <https://leafletjs.com/>

⁹ <https://www.chartjs.org/>

Para desarrollar el lado servidor (back-end) se utilizó el Django¹⁰ web framework, el cual fomenta el desarrollo rápido y limpio de aplicaciones web seguras y mantenibles.

Figura 7 1) pantalla de inicio de sesión, 2) pantalla para consulta de datos, y 3) pantalla para registro de nuevas ubicaciones.



Fuente: Elaboración propia

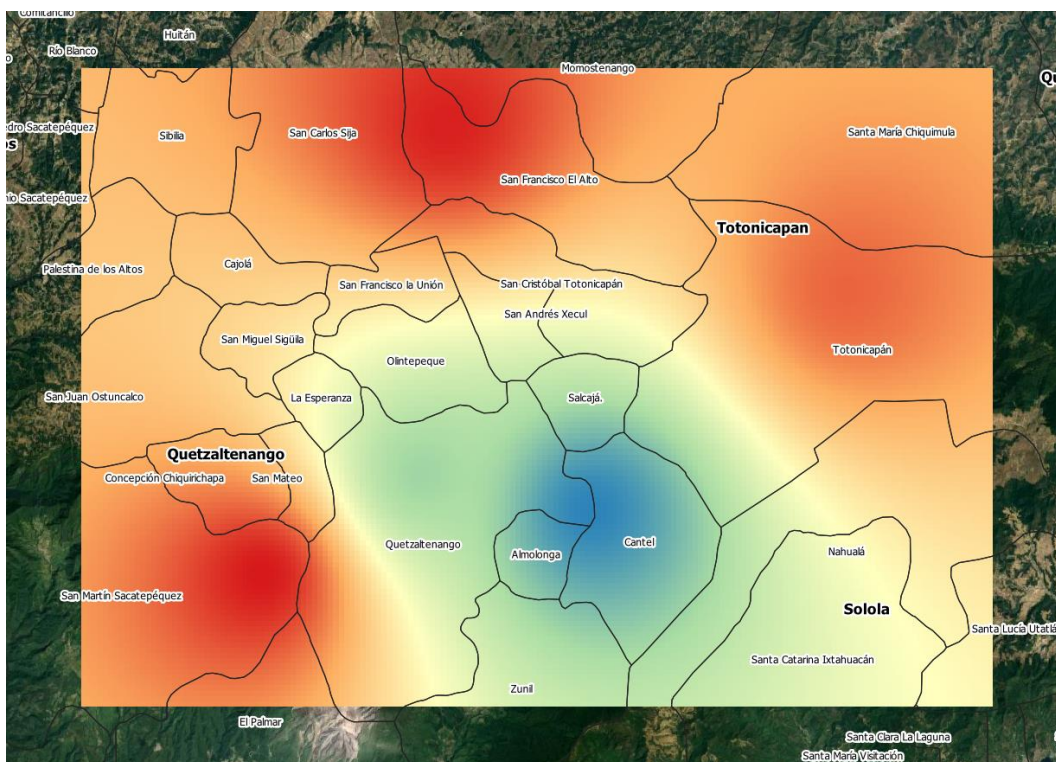
Durante el desarrollo del prototipo, se detectaron problemas con algunos sensores en la red de estaciones meteorológicas, y también en la transmisión de datos entre las estaciones y el servidor de base de datos. Debido a que la finalidad del proyecto era

¹⁰ <https://www.djangoproject.com/>

evaluar el proceso de distribución de información meteorológica, y que los problemas detectados podrían afectar de forma negativa la evaluación de funcionalidad y usabilidad, se decidió simular la adquisición de datos utilizando datos históricos de la red de estaciones. Este cambio no es visible para los usuarios del prototipo, aun así, este problema y sus implicaciones fueron explicados a los usuarios. Para la simulación se utilizó un conjunto de datos históricos y un componente que envía estos a la base de datos del sistema simulando ser la red de estaciones meteorológicas.

La preparación del conjunto de datos para la simulación se realizó utilizando scripts de Python y SQL. El conjunto de datos contiene las coordenadas de las estaciones meteorológicas, y para cada estación, contiene una serie temporal (del 01/01/2021 al 31/12/2021) de mediciones de los parámetros: temperatura, humedad relativa, irradiación solar, precipitación, velocidad y dirección del viento, y humedad de suelo de 10 a 60 cm de profundidad en incrementos de 10 cm. Utilizando los datos de variables climáticas y scripts de Python, se realizaron interpolaciones espaciales sobre el área de estudio para cada uno de los parámetros. La interpolación se realizó con resolución espacial de 250mt y temporal de 1 hora. La **Figura 8** muestra la interpolación de temperatura del día 1 de enero de 2021 a las 12:00 horas, y también muestra la cobertura espacial de la interpolación.

Figura 8 Interpolación de mediciones de temperatura en el área de estudio



Fuente: Elaboración propia

Para poner el prototipo a disposición de los usuarios de prueba, era necesario contar con una infraestructura de información y comunicación. Debido a los altos costos y tiempo requeridos para adquirir y configurar una infraestructura propia, se decidió utilizar servicios en la nube. Además de reducir costos y tiempo, otra ventaja importante de utilizar servicios en la nube es la posibilidad de escalar (aumentar la capacidad de procesamiento, almacenamiento, etc.) de forma ágil dependiendo de la carga de trabajo. Por esta razón, se realizó un análisis de los servicios disponibles en la plataforma Amazon Web Services (AWS). Esta actividad permitió identificar los siguientes servicios como opciones viables para hospedar el prototipo para la investigación:

- **Amazon Relational Database Service (RDS)** permite trabajar con el motor de bases de datos PostgreSQL. Este permite almacenar las observaciones puntuales obtenidas de las estaciones meteorológicas, las cuales son utilizadas para generar mapas para toda el área de trabajo, por medio de métodos de interpolación espacial. Además, esta base de datos almacena las ubicaciones de interés (áreas de producción de frutales), y las series temporales de observaciones de los parámetros meteorológicos de interés.
- **Amazon Elastic Compute Cloud (EC2)** para ejecutar una instancia del sistema operativo Linux. Esta instancia es utilizada para correr los procedimientos de geoprocésamiento para generar los mapas de los parámetros climáticos, y actualizar las series temporales de observaciones de las ubicaciones de interés. La ejecución de estos procedimientos se realiza de forma automática en intervalos de una hora.
- **AWS Elastic Beanstalk (EB)** para hospedar el prototipo de aplicación web. Este servicio utiliza EC2 para ejecutar la instancia donde se ejecuta el servidor web para hospedar la aplicación web.

Al concluir el desarrollo del prototipo, este fue hospedado en Amazon Web Services, y se procedió a realizar la prueba de funcionalidad y usabilidad. La prueba se realizó en tres fases, con la participación de 17 usuarios. En la primera fase, se demostró el uso de cada función del prototipo, y luego de demostrar cada función, se solicitaba a los participantes utilizar y evaluar la dificultad de uso en una escala de 0 (muy fácil) a 10 (muy difícil). En la segunda fase, se solicitó a los participantes utilizar el prototipo de forma independiente y evaluar nuevamente cada función utilizando la misma escala. Dada esta escala de valoración y que en total se demostraron y evaluaron diez funciones, para cada usuario la dificultad general varía entre 0 (muy fácil) y 100 (muy difícil).

La **Figura 9** muestra los resultados por función evaluada, todos los valores obtenidos son bajos, lo que indica que los usuarios consideran fáciles de utilizar todas las funciones. Además, los valores para todas las funciones disminuyeron entre la evaluación durante el entrenamiento y el uso independiente (celdas verdes en la columna diferencia), indicando que una vez entrenados los usuarios utilizaron las funciones con mayor facilidad.

La **Figura 10** muestra los resultados por participante. En el entrenamiento, cinco participantes asignaron valores que indican una postura neutra (valores alrededor de 50), es decir no encuentran el prototipo muy fácil, pero tampoco muy difícil de utilizar. Además, tres participantes indicaron que fue más difícil utilizar el prototipo de forma independiente (valores en color blanco en la columna diferencia). En general, los resultados presentados en las tablas, y la discusión con los participantes indican que el prototipo posee funciones fáciles de utilizar y que satisfacen los requerimientos identificados. Sin embargo, se enfatizó que un requerimiento no fue abordado, proporcionar predicciones.

Figura 9 Resultados por función

No	Función	Entrenamiento	Uso independiente	Diferencia
		10	10	
1	Registrar ubicación	3.12	1.76	1.35
2	Seleccionar coordenadas manualmente	3.31	1.53	1.78
3	Seleccionar coordenadas con GPS	2.29	1.53	0.76
4	Eliminar ubicación	2.59	1.29	1.29
5	Seleccionar ubicación para consultar datos	2.65	1.53	1.12
6	Consultar datos descriptivos	2.41	1.76	0.65
7	Consultar datos de horas previas	2.63	1.59	1.04
8	Visualizar variable	2.44	1.41	1.03
9	Visualizar variable con días previos	2.59	1.41	1.18
10	Exportar datos a CSV o JSON	2.41	1.81	0.60
Promedio general		2.64	1.56	1.08

Fuente: Elaboración propia

Figura 10 Resultados por usuario

	Entrenamiento	Uso independiente	Diferencia
Correlativo	100	100	
1	17	64	-47
2	19	10	9
3	14	4	10
4	62	3	59
5	53	41	12
6	24	3	21
7	16	10	6
8	13	9	4
9	12	6	6
10	5	10	-5
11	21	10	11
12	12	0	12
13	49	26	23
14	13	6	7
15	52	32	20
16	50	10	40
17	9	20	-11
Promedio general	25.94	15.53	10.41

Fuente: Elaboración propia

En la tercera fase, se les solicitó a los participantes llenar el cuestionario SUS para evaluar la usabilidad general del prototipo. Los resultados se presentan en el **Anexo 1**, las celdas en rojo indican que el participante no respondió al enunciado. El punteo general (promedio general) es de 77 puntos, lo que indica que el prototipo es “**Bueno**”, es decir que es fácil de aprender, intuitivo de utilizar, y que a los usuarios les gustaría utilizarlo para satisfacer sus necesidades de información meteorológica. Sin embargo, existen aspectos a mejorar, por ejemplo: incluir predicciones (identificado durante el análisis de requerimientos), permitir consultar directamente los valores de las estaciones, y realizar comparaciones entre puntos de interés.

V. CONCLUSIONES

1. Se desarrolló una aplicación agroclimática web adaptativa, debido a que tiene la ventaja de ser independiente del sistema operativo y también de poder proporcionar una interfaz capaz de facilitar el acceso a los datos desde dispositivos tales como teléfonos inteligentes, tabletas, computadoras personales (tanto portátiles como de escritorio).
2. El prototipo de sistema fue hospedado en Amazon Web Service, por ser un servicio en la nube que permite la posibilidad de escalar (aumentar la capacidad de procesamiento y almacenamiento), además de reducir costos y tiempo.
3. De acuerdo a las pruebas de funcionalidad, el prototipo del sistema es capaz de interpolar adecuadamente las mediciones de las variables agroclimáticas proporcionadas por las estaciones meteorológicas ubicadas en el área de interés.
4. En general, los usuarios que evaluaron la funcionalidad, indicaron que el prototipo, presenta una navegación simple e intuitiva, donde el diseño se adapta bien al tamaño de pantalla del dispositivo en uso, concluyendo que posee funciones fáciles de utilizar.
5. La prueba de usabilidad obtuvo un puntaje general de setenta y siete puntos, lo cual indica que el prototipo es “Bueno”, es decir que es fácil de aprender, intuitivo de utilizar y que a los usuarios les gustaría utilizarlo para satisfacer sus necesidades de información meteorológica.



VI. RECOMENDACIONES

1. Debido a la buena funcionalidad y usabilidad que presentó el prototipo de sistema, se recomienda expandir las capacidades de dicha aplicación para investigadores y académicos
2. Fortalecer y densificar la red de estaciones meteorológicas, con el fin de proporcionar datos de calidad al prototipo de sistema y que por ende esta aplicación web, pueda ser de más ayuda en la resiliencia de los agricultores.
3. Involucrar al sector académico para que participe en una mejora continua del prototipo de sistema y así poder integrar un módulo que proponga predicciones agrometeorológicas, las cuales sirvan al agricultor para prevenir daño por heladas, déficit hídrico, etc.
4. Al sector público dedicado al ramo de meteorología, eliminar la burocracia para compartir los datos meteorológicos y así poder ser usados en aplicaciones como la evaluada en esta investigación con el único fin de ayudar al desarrollo agrícola del país.
5. Motivar a las asociaciones y Organizaciones no gubernamentales (ONGs), a unir esfuerzos y datos para fortalecer el prototipo de sistema de la presente investigación



BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado Quiroa, Héctor; García Hernández, Hugo; Alvarado Soto, V. J. (2019). *Regionalización climática del valle de Quetzaltenango y Totonicapán, para el cultivo de frutales deciduos.*
- Alvarado Quiroa, H. (2001). *Factibilidad agroclimática de la producción de frutales deciduos, en el valle de Quetzaltenango.*
- Bangor, A., Kortum, P., & Miller, J. (2009). Determining what individual SUS scores mean: Adding an adjective rating scale. *Journal of Usability Studies*, 4(3), 114–123.
- Boletín Estadístico 2do Semestre 2019 – SIT.* (n.d.). Retrieved September 7, 2020, from <https://sit.gov.gt/download/boletin-estadistico-2do-semester-2019/>
- Brooke, J. (1986). SUS -A quick and dirty usability scale. In P. Jordan, B. Thomas, I. McClelland, & B. Weerdmeester (Eds.), *Usability Evaluation In Industry*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781498710411>
- Brooke, J. (2013). SUS: a retrospective. *Journal of Usability Studies*, 8(2), 29–40.
- Caine, A., Dorward, P., Clarkson, G., Evans, N., Canales, C., Stern, D., & Stern, R. (2015). *Mobile applications for weather and climate information: their use and potential for smallholder farmers.* www.ccafs.cgiar.org
- Calderón Alcaraz, E. (1993). *Fruticultura General*. Limusa.
- Castro Loarca, O. (1996). *El balance hídrico en la experimentación agrícola.*
- Falla Gamboa, J. (2020). *Geoprocesamiento - Campus Virtual UCI.* http://www.ucipfg.com/Repositorio/MGAP/MGAP-05/BLOQUE-ACADEMICO/Unidad-3/complementarias/GeoProcesamiento_nov_2012.pdf
- González, I.; Alvarado, H. (1999). *Manual del cultivo de melocotón.*
- Hernández Navarro, M. L. (2017). La agroclimatología: instrumento de planificación agrícola. *Geographicalia*, 30(30), 213. https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.1993301819
- Kendall, K. E. (2005a). *Análisis y diseño de sistemas.*
- Kendall, K. E. (2005b). *Análisis y diseño de sistemas.* https://books.google.com.gt/books?hl=es&lr=&id=5-rZA0FggusC&oi=fnd&pg=PA1&dq=analisis+y+diseño+de+sistemas&ots=1E9QJDz4Dd&sig=cKT1RqBL2-aaVBc0wMLjfO5wpbM&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Laudon, K. C., & Laudon, J. P. (2012). *Sistemas de información gerencial* (12th ed.). PEARSON EDUCACIÓN.
- Macefield, R. (2009). How to specify the participant group size for usability studies: a practitioner's guide. *Journal of Usability Studies*, 5(1), 34–45.
- Olaya, V. (2009). Sistemas de Información Geográfica. *Cuadernos Internacionales de Tecnología Para El Desarrollo Humano, ISSN-e 1885-8104, N.º. 8, 2009 (Ejemplar Dedicado a: Tecnologías de La Información Geográfica)*, 8, 15.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3113707&info=resumen&idioma=SPA>

Patel, H. P., Patel, D., Patel, H., Professor, A., & Chandaben Mohanbhai Patel, S. (2016). *Survey of Android Apps for Agriculture Sector Application of Machine Learning View project SURVEY OF ANDROID APPS FOR AGRICULTURE SECTOR*.
<https://doi.org/10.5121/ijist.2016.6207>

Rodríguez Roa, A. O. (2019). *Desarrollo de un sistema de alertas agroclimáticas tempranas para la chinche de los pastos, Collaria scenica, en la sabana de Bogotá*.
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7751>

RUIZ CORRAL, J. A., Medina García, G., & García Romero, G. E. (2018). Sistema de información agroclimático para México- Centroamérica (SIAMEXCA). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(1), 1. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i1.843>

Six, J. M., & Macefield, R. (2016). *How to Determine the Right Number of Participants for Usability Studies*.

Zumba Gamboa, J. (2018). Evolución de las Metodologías y Modelos utilizados en el Desarrollo de Software. *INNOVA Research Journal*, ISSN-e 2477-9024, Vol. 3, Nº. 10, 2018, Págs. 20-33, 3(10), 20–33.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6777227&info=resumen&idioma=SPA>

ANEXOS

Anexo A. Cuestionario SUS para evaluar la usabilidad general del prototipo

Enunciado	Participante																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1. Pienso que me gustaría utilizar este sistema con frecuencia	2	4	5	5	4	5	5	4	4	5	5	5	5	5	5	3	4
2. Encuentro el sistema innecesariamente complejo	4	1	2	5	3	4	2	3	2	2	1	1	5	1	3	2	2
3. Pienso que el sistema es fácil de utilizar	5	5	5	5	4	5	5	4	4	5	5	5	5	4	4	4	4
4. Pienso que necesitaría la ayuda de un técnico para poder utilizar este sistema	3	3	1	3	2	3	1	2	2	1	2	1	5	1	1	1	2
5. Encuentro las funciones del sistema bien integradas	4	5	4	5	4	4	4	4	4	5	4	5	5	4	4	4	4
6. Pienso que existe mucha inconsistencia en este sistema	4	1	3	2	2	2	2	3	2	2	1	1	1	1	2	3	2
7. Me parece que la mayoría de las personas aprenderían a utilizar este sistema rápidamente	5	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5	3	5	4	4	2	4
8. Encuentro el sistema muy complicado de utilizar	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	4	2	2
9. Me sentí cómodo utilizando el sistema	4	4	5	5	5	4	4	5	4	5	5	5	5	5	5	3	4
10. Necesité aprender muchas cosas antes de poder utilizar el sistema	4	4	2	3	3	2	1	2	2	2	1	1	2	1	4	1	2
Punteo	53	78	83	73	73	73	85	73	75	90	95	95	78	93	68	58	75
Resultado de usabilidad	POBRE	BUENO	EXCELENTE	BUENO	BUENO	BUENO	EXCELENTE	BUENO	BUENO	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE	BUENO	EXCELENTE	POBRE	POBRE	BUENO

Valores: 1 = Totalmente en desacuerdo, 2 = En desacuerdo, 3 = Neutral, 4 = De acuerdo, 5 = Totalmente de acuerdo.

Promedio general	77
Resultado de usabilidad	BUENO

Anexo B. Boleta para la prueba de funcionalidad y usabilidad

Usuario: _____ Contraseña: _____

Ubicación: _____ Fecha: _____ Hora inicio: _____ Hora fin: _____

Sistema operativo: _____ Navegador web: _____

Dispositivo: _____ Tamaño pantalla: _____

Edad: Menor a 20 ____ 21 a 30 ____ 31 a 40 ____ 41 a 50 ____ Mayor a 50 ____

Escolaridad: Ninguna ____ Primaria ____ Secundaria ____ Diversificado ____
Universidad ____

Sección 1: Esta parte tiene como objetivo evaluar su experiencia al aprender a utilizar las funciones del sistema, y su experiencia al utilizarlas por cuenta propia.

Función	Entrenamiento											Uso independiente										
	Muy fácil						Muy difícil					Muy fácil						Muy difícil				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Registrar ubicación																						
Seleccionar coordenadas manualmente																						
Seleccionar coordenadas con GPS																						
Eliminar ubicación																						

Seleccionar ubicación para consultar datos																				
Consultar datos descriptivos																				
Consultar datos de horas previas																				
Visualizar variable																				
Visualizar variable con días previos																				
Exportar datos a CSV o JSON																				

Observaciones:

Sección 2: Esta parte tiene como objetivo evaluar su experiencia en general con el sistema.

1. Pienso que me gustaría utilizar este sistema con frecuencia

Totalmente en desacuerdo	Desacuerdo	Neutral	De acuerdo	Totalmente de acuerdo

2. Encuentro el sistema innecesariamente complejo

Totalmente en desacuerdo	Desacuerdo	Neutral	De acuerdo	Totalmente de acuerdo

3. Pienso que el sistema es fácil de utilizar

Totalmente en desacuerdo	Desacuerdo	Neutral	De acuerdo	Totalmente de acuerdo

4. Pienso que necesitaría la ayuda de un técnico para poder utilizar este sistema

Totalmente en desacuerdo	Desacuerdo	Neutral	De acuerdo	Totalmente de acuerdo

5. Encuentro las funciones del sistema bien integradas

Totalmente en desacuerdo	Desacuerdo	Neutral	De acuerdo	Totalmente de acuerdo

6. Pienso que existe mucha inconsistencia en este sistema

Totalmente en desacuerdo	Desacuerdo	Neutral	De acuerdo	Totalmente de acuerdo

7. Me parece que la mayoría de las personas aprenderían a utilizar este sistema rápidamente

Totalmente en desacuerdo	Desacuerdo	Neutral	De acuerdo	Totalmente de acuerdo

8. Encuentro el sistema muy complicado de utilizar

Totalmente en desacuerdo	Desacuerdo	Neutral	De acuerdo	Totalmente de acuerdo

9. Me sentí cómodo utilizando el sistema

Totalmente en desacuerdo	Desacuerdo	Neutral	De acuerdo	Totalmente de acuerdo

10. Necesité aprender muchas cosas antes de poder utilizar el sistema

Totalmente en desacuerdo	Desacuerdo	Neutral	De acuerdo	Totalmente de acuerdo

Observaciones:





