

Ambiente web para el aprendizaje y toma de decisiones mediante la simulación de un cultivo de cítricos monitoreado y controlado.

Geyner Felipe Rojas Torres y Daniel Felipe Ardila Gómez

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero de Sistemas e Informática

Director

Hugo Hernando Andrade Sosa

Magíster en Informática

Codirector

José Luis Mojica Estrada

Magíster en Informática

Universidad Industrial De Santander

Faculta De Ingeniería Fisicomecánicas

Escuela De Ingeniería De Sistemas

Bucaramanga

2024

AGRADECIMIENTOS

Con este proyecto se culmina una etapa de aprendizaje, acompañada de infinidad de emociones y situaciones que por las que en muchas ocasiones no esperamos pasar. Sin embargo, al mirar atrás reconocemos lo mucho que hemos avanzado, las amistades construidas, los momentos de alegrías y sobre todo el reconocimiento de aquellos que de una u otra manera han estado presentes con su apoyo hacia nosotros en este proyecto profesional como lo es convertirnos en Ingenieros de Sistemas de nuestro segundo hogar, la Universidad Industrial de Santander. A nuestra alma mater, profesores, familia, amigos y a todas aquellas personas que han creído en nosotros, ¡Gracias!

Geyner Felipe Rojas Torres

Daniel Felipe Ardila Góme

Tabla de Contenido

Introducción	11
1.Planteamiento del problema.....	12
2.Objetivo general.....	14
2.1.Objetivos específicos	14
3.Marco teórico referencial.....	15
3.1.Antecedentes	15
3.2.Teoría y Conceptos	17
3.2.1.TIC en el sector agrícola colombiano	17
3.2.2.Pensamiento Sistémico y Dinámica de Sistemas (DS) de Jay W. Forrester.....	18
3.2.3.Lógica Difusa.....	18
3.2.4.Ingeniería de Software	19
3.2.5.Pruebas de caja negra:.....	19
3.2.6.Pruebas de caja blanca:	19
3.2.7.Testing aleatorio:	19
3.2.8.La Instrumentación Electrónica	20
3.2.9.Tecnificación de cultivos	20
4.Metodología.....	21
4.1 Primer Prototipo.....	22

4.1.1.Etapa de comunicación	22
4.1.2.Etapa Plan rápido	22
4.1.3.Etapa Modelado de diseño rápido.....	22
4.1.4.Etapa Construcción del prototipo.....	25
4.1.5.Etapa Desarrollo, entrega y realimentación	27
4.2.Segundo prototipo.....	28
4.2.1Etapa Comunicación	28
4.2.2Etapa plan rápido	28
4.2.3Etapa Modelado de diseño rápido.....	28
4.2.4Etapa Construcción del prototipo.....	29
4.2.5Etapa Desarrollo, entrega y realimentación.....	32
4.3.Tercer prototipo	32
4.3.1Etapa Comunicación	32
4.3.2Etapa Plan rápido	32
4.3.3Etapa modelada de diseño rápido	32
4.3.3.1Requerimientos Funcionales	33
4.3.3.2Requerimientos no funcionales.....	34
4.3.3.3Diagramas de casos de uso	35
4.3.4Etapa Construcción del prototipo.....	36
4.3.5Etapa Desarrollo, entrega y realimentación.....	40

	5
4.4.Cuarto prototipo	42
4.4.1.Etapa comunicación	42
4.4.2.Etapa plan rápido	42
4.4.3.Etapa modelada de diseño rápido	43
4.4.4.Etapa construcción del prototipo	45
4.4.5.Etapa desarrollo, entrega y realimentación	45
4.5.Validación del modelo	47
5. Prototipo final	50
5.1. Etapa de comunicación	50
5.1.1. Etapa de plan rápido.....	51
5.1.2. Etapa de diseño	52
5.2. Etapa de optimización del cultivo.....	54
5.3. Montaje del Aplicativo Web en Servidores del Grupo SIMON	54
5.3.1 Back-end	55
5.3.2 Front-end.....	55
6. Conclusiones	55
7. Trabajo futuro	57
Referencias Bibliograficas	58

Tabla de figuras

Figura 1 Metodología por prototipos	21
Figura 2 Graficas de variables lingüísticas	23
Figura 3 Variable lingüística de salida.....	26
Figura 4 Estructura general del back-end	27
Figura 5 Sectores del modelo.....	29
Figura 6 Referencia grafica del clima en Bucaramanga	31
Figura 7 Diagrama de actividades.....	36
Figura 8 Datos del cultivo.....	37
Figura 9 Comportamiento del cultivo simulador inicial	38
Figura 10 Datos del cultivo ajustados por el usuario	40
Figura 11 Estructura en Angular.....	41
Figura 12 Estructura en Angular.....	46
Figura 13 Grafica de validación del desarrollo del cultivo en trabajos previos.....	47
Figura 14 Graficas de validación en un ciclo anual	48
Figura 15 Grafica de validación de los datos pluviométricos en trabajos previos.....	48
Figura 16 Grafica de validación 2.....	49
Figura 17 Valores para la validación del error.....	49
Figura 18 Representación del funcionamiento del ambiente web	52

Lista de Tablas

Tabla 1 Consolidado obtenido a partir de las graficas	24
Tabla 2 RF01-Hacer Simulaciones	33
Tabla 3 RNF01 - Interfaz de usuario	34
Tabla 4 RNF02 - Disponibilidad.....	34
Tabla 5 RNF03 - Desempeño	35
Tabla 6 RF01 Actualizado	43
Tabla 7 Datos reales y del simulador	49
Tabla 8 Constantes	52

Glosario

Conservación de suelos: Se refiere a una serie de técnicas y/o prácticas implementadas por los agricultores dependiendo de la época del año (sequía o lluvia) cuya finalidad es la de prevenir la erosión del suelo, retener la humedad y reducir la pérdida de nutrientes.

Dinámica tradicional de riego: Son las prácticas tradicionales asociadas a la forma en que los agricultores siembran sus tierras en función a la temporada climática, esta puede definirse por meses o trimestres, sin embargo, esta es inexacta en la actualidad debido a varios factores climáticos cambiantes.

Riego por goteo: Es el método de regadío más eficiente actualmente, ya que permite tener una gestión óptima del agua, tanto en zonas áridas como en periodos de sequías.

Selección de Cultivos: En Colombia se definen los cultivos por “temporadas” dependiendo de que se requiera para que este llegue a un término acorde para su venta, es por ello, que en algunas ocasiones ciertos cultivos escasean dependiendo del mes del año.

Temporada de Lluvia: Es el periodo del año en el que se espera y/o predice que se producirán las mayores precipitaciones pluviales, lo que dependiendo de la zona del país puede afectar o beneficiar a los agricultores.

Temporada de Sequía: Es el periodo del año en que hay una prolongada disminución de las precipitaciones pluviales en algunas regiones del país, lo cual reduce el agua del suelo y genera escases en la almacenada para los cultivos poniendo así en riesgo la producción agrícola

Resumen

Título: Ambiente web para el aprendizaje y toma de decisiones mediante la simulación de un cultivo de cítricos monitoreado y controlado**.

Autores: Geyner Felipe Rojas Torres & Daniel Felipe Ardila Gómez**.

Palabras Clave: Agricultura, Tecnificación de cultivos, Métodos de riego e Ingeniería de Software.

Descripción: Colombia es país geográficamente privilegiado en materia agrícola, al estar sobre la línea del ecuador su clima permite el desarrollo de la economía agrícola lo cual cataloga al país como una potencia en esta materia, sin embargo, problemáticas internas han contribuido en la prevalencia de las técnicas artesanales y/o tradicionales; la comunidad agrícola depende en gran medida del ciclo climático por lo cual enfrentan periodos de excesos pluviales durante la temporada de lluvias y escasez durante la sequía, y al ser este el sector económico que genera mayor consumidor de agua en el país, se hace necesario optimizar su uso. Es debido a ello que, este proyecto busca involucrar elementos tecnológicos a través del desarrollo de un simulador web basado en el modelo de simulación con dinámica de sistemas planteado desde la Maestría en Ingeniería de Sistemas UIS denominado como *Propuesta de modelo de simulación dinámico-sistémico difuso para la gestión del ciclo productivo de plantaciones agrícolas aplicado el ciclo fenológico de cítricos* (Andrade & Mojica, 2021) el cual contempla simular y controlar la producción de productos cítricos, partiendo de la adaptación a los distintos escenarios que se integraran en un ambiente web para facilitar su uso, puesto que se plantea mejorar la gestión de los cultivos cítricos en Colombia.

**Trabajo de Grado para la obtención del título de Ingeniero de Sistemas.

** Facultada de Ingenierías Fisicomecánica, Escuela de Sistemas e Informática. Director: Hugo Andrade; Codirector: José Mojica.

Abstract

Title: Web Environment for Learning and Decision-Making through the Simulation of Monitored and Controlled Citrus Cultivation*.

Authors: Geyner Felipe Rojas Torres & Daniel Felipe Ardila Gómez**.

Keywords: Agriculture, Crop Technification, Irrigation Methods, Software Engineering.

Description: Colombia is geographically privileged in agricultural matters. Being located on the equator, its climate allows for the development of the agricultural economy, which categorizes the country as a powerhouse in this field. However, internal problems have contributed to the prevalence of artisanal and/or traditional techniques. The agricultural community depends greatly on the climatic cycle, facing periods of excess rainfall during the rainy season and scarcity during droughts. As this sector is the largest consumer of water in the country, it is necessary to optimize its use. Therefore, this project aims to involve technological elements through the development of a web simulator based on the system dynamics simulation model proposed by the Master's in Systems Engineering at UIS, titled "Proposal for a Dynamic-Systemic Fuzzy Simulation Model for Managing the Productive Cycle of Agricultural Plantations Applied to the Phenological Cycle of Citrus" (Andrade & Mojica, 2021). This model aims to simulate and control the production of citrus products by adapting to different scenarios, which will be integrated into a web environment to facilitate its use, as it aims to improve the management of citrus crops in Colombia.

* Thesis for the Degree of Systems Engineer.

** Faculty of Physical Mechanical Engineering, School of Systems Engineering and Computer Science. Director: Hugo Andrade; Co-director: José Mojica.

Introducción

Los países de América del sur son privilegiados en la agricultura debido a su clima mayormente tropical. En el caso particular, Colombia posee un gran potencial agrícola, pues su diversidad en ecosistemas montañosos, de cordilleras y planicies benefician el cultivo de gran variedad de frutas, verduras y tubérculos. Sin embargo, Colombia es un país que se encuentra marcado por su contexto desigual, en donde a pesar de tener tierras tan ricas, su población posee una gran brecha social que divide al campo y la ciudad (DANE 2021) contribuyendo a que los procesos de cultivo se encuentren poco o nada tecnificados.

Según el artículo, *Tecnificación de la agricultura, medida para proteger el agua* (Altieri, 2021) en Colombia, el sector agrícola es el mayor demandante de los recursos hídricos del país, desperdiciando en muchos casos una gran cantidad del preciado recurso utilizando diferentes métodos de riego ineficientes. En otros casos, en los lugares con difícil acceso a los recursos hídricos, los campesinos se ven obligados a depender de los ciclos de lluvia, que generan ciclos de producción y escasez con su correspondiente variación de precios. Afectando negativamente tanto a los productores, como a los consumidores.

La dinámica desfavorable descrita muestra una necesidad urgente de estrategias para mejorar el uso de los recursos. Lo cual grosso modo, se podría solucionar al involucrar a las personas y la tecnología. Es decir, crear programas que faciliten la tecnificación del sector agrícola.

A partir de lo anterior y en pro de aportar a preocupaciones investigativas del grupo *SIMON* de investigaciones de la Universidad Industrial de Santander, en su labor conjunta con el Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia *IPRED*. Este proyecto se propone

desarrollar un simulador web que recree la dinámica productiva agrícola, mediante un sistema dinámico-difuso (basado en el proyecto de maestría de Mojica y dirigido por Andrade- 2021, que permita simular el control de la dinámica productiva de un cultivo de cítricos monitoreado presencialmente o a distancia, simulador que a su vez sea útil para promover el aprendizaje por técnicos, tecnólogos y agricultores facilitando la toma de decisiones para la inversión agrícola.

1. Planteamiento del problema

Colombia posee ecosistemas diversos, esto genera un gran potencial agrícola en el territorio. Sin embargo, en el campo aún son predominante las técnicas artesanales de cultivo y de baja cobertura tecnológica, en especial en por los pequeños y medianos agricultores.

Los agricultores tradicionales siembran sus cosechas siguiendo el ciclo climático, ya que son dependientes del agua que pueden obtener de fuentes hídricas; en épocas de lluvia hay abundancia y durante la sequía escasez, sin embargo, la constante producción gases efecto invernadero en el mundo ha ocasionado que el cambio climático sea más acelerado e impredecible lo cual nos deja en una situación desfavorable.

Así mismo, el sector agrícola es uno de los sectores que más demanda agua. Esto hace necesario y urgente plantear modelos que optimicen la gestión de los recursos hídricos, en pro de los ODS.

Al respecto, desde el gobierno colombiano se han implementado diferentes programas para mejorar este sector con ideas innovadoras y uso de nuevas tecnologías. Además, algunos bancos están ofreciendo diferentes tipos de créditos para que los productores puedan mejorar la forma de cultivo. Estos créditos tienen como fin otorgar una oportunidad de financiación a largo

o corto plazo para los agricultores interesados en sembrar cítricos, en especial el limón Tahití cuya exportación está en auge (Campecino.com, 2019).

Así mismo, desde el grupo de investigación SIMON se han realizado diferentes proyectos de grados direccionados a la búsqueda de alternativas para el mejoramiento del sector agrícola. En particular, en el proyecto Maestría en Ingeniería de Sistemas titulado “Propuesta de modelo de simulación dinámico-sistémico difuso para la gestión del ciclo productivo de plantaciones agrícolas aplicado el ciclo fenológico de cítricos” (Andrade & Mojica, 2021), que a continuación se referenciará con la sigla MS-DSD-GA se han realizado planteamientos direccionados al mejoramiento en la gestión de recursos y producción en las plantaciones de cítricos. Igualmente es de referenciar la propuesta de investigación “Laboratorio para el aprendizaje de la piscicultura con sistema de producción automatizada en ambiente virtual” (Andrade & Vásquez, 2016). Siendo los proyectos señalados, predecesor de la presente propuesta y a los cuales se propone complementar.

Con base en lo anterior, el presente proyecto contempla el desarrollo de un ambiente web para apoyar la toma de decisiones y el aprendizaje en cuanto a la instrumentación, mediante monitoreo y control de un cultivo de limones Tahití. Así mismo, se plantea la implementación de los ambientes estructurados en términos de dos módulos. El primer módulo permite simular el cultivo real. El segundo módulo representa el sistema de cultivo virtual con el cual se experimenta para apoyar la toma de decisiones.

Es de señalar que, al implementar este sistema en un cultivo real, el primer módulo será remplazado por el cultivo real monitoreado. Que, a su vez servirá para mejorar la gestión de los recursos e interactuar con el cultivo.

2. Objetivo general

- Desarrollar un simulador en ambiente web, que facilite el aprendizaje y toma de decisiones para la gestión de un cultivo de cítricos a monitorear y controlar; soportado en el modelo de dinámica de sistemas de Andrade y Mojica (2021); Modelo de Simulación Dinámico Sistémico Difuso para la Gestión Agrícola (MS-DSD-GA).

2.1. Objetivos específicos

- Adecuar el Modelo de Simulación Dinámico Sistémico Difuso para la Gestión Agrícola (MS-DSD-GA) (Andrade & Mojica, 2021) en dos instancias que faciliten:
 - La representación simulada de la dinámica del cultivo emitiendo y recibiendo señales.
 - La experimentación simulada del cultivo, para la toma de decisiones de riego y suministro de nutrientes.
- Establecer, a partir de las dos instancias del modelo, el sistema simulado de monitoreo y toma de decisiones considerando distintos escenarios en un posible sistema real.
- Desarrollar un ambiente web que integre el producto de los objetivos anteriores, facilite un proceso de aprendizaje y/o apoye la toma de decisiones para proyectos de instrumentación.

3. Marco teórico referencial

3.1. Antecedentes

Durante la revisión de antecedentes se encontraron estudios y/o planteamientos que utilizan como base la Dinámica de Sistemas y Lógica Difusa, donde se destaca que, esta correlación permite que los postulados hechos sean fácilmente aplicados a distintos campos como la construcción, la agricultura o el procesamiento de residuos mediante el proceso de simulación. Al respecto en el texto “Integración de la Lógica Difusa a la Dinámica de Sistemas para la selección de terrenos de cultivos agrícolas” se menciona que si bien la instalación de un sistema agrícola es un proceso complejo, cuando se tiene conocimiento del tipo de cultivo acompañado de un análisis de suelos se pueden tener mayores beneficios analizando los distintos escenarios lo cual permite tomar acciones correctivas (Martinez & Andrade, 2016).

Es decir, que la dinámica de sistemas permite integrar o considerar distintos factores como es el análisis del clima, el suelo, el riego y la relación inherente de estos con la dinámica de producción agrícola. Cabe mencionar que en algunos casos se ha realizado una integración con los planteamientos de la lógica difusa (Fuzzy) donde se contempla el espacio/suelo en estado métrico, que busca la optimización del agua de riego en las plantaciones y el uso del suelo, donde es posible llegar a mejorar el impacto ambiental en el ecosistema y los factores socio económicos en la población campesina (TIC en el sector agrícola, 2018).

Mojica y Andrade (2021) realizan además la integración del índice de *Estrés Hídrico o CWSI*, el cual es variable según la dinámica hídrica y posee una relación con la floración; plantean un modelo de simulación Dinámico Sistémico- Difuso aplicado a cítricos, sentando las bases “para la construcción de un producto tecnológico que permita la modificación, regulación

y/o gestión de la producción de cítricos en la zona ecuatorial, con las variables propias de la geografía de la región, como la inclinación del terreno entre otras” (Andrade & Mojica, 2021). Finalmente es menester mencionar que es precisamente este último modelo el que se asume, el presente proyecto para realizar las simulaciones del fenómeno real y las simulaciones para la toma de decisiones para el presente proyecto. Modelo que tiene las siguientes premisas:

- El riego del agua se realiza de manera uniforme en el terreno simulando el comportamiento de la lluvia, esto debido a que el modelo funciona como una ecuación diferencial ordinaria.
- Se contempla un solo horizonte del terreno, es decir, la plata se encontrará plantada en un solo tipo de suelo.
- La evaporación se realiza mientras el suelo contenga un nivel de humedad superior al punto de marchitez permanente debido a que si no fuera así la plata no existiría.
- No se contempla el consumo extra de la planta debido al aumento de frutos.
- No se contempla el nivel freático de baja profundidad, para facilidad de la simulación.
- Se considera un PH neutro el suelo, para considerar de una mejor manera la absorción de nutrientes.
- Los nutrientes que la planta consume del suelo son representados por variables exógenas para que la absorción de estos no tenga retardos.
- No se asume la cohesión entre los nutrientes y el suelo por la variabilidad del terreno.

- No se consideran los daños por aplicación excesiva de alguno de los nutrientes.

3.2. Teoría y Conceptos

En este apartado se busca desglosar los parámetros teóricos y conceptuales dentro de los cuales se enmarca este proyecto; para ello, inicialmente se definirá el contexto colombiano en función con las TIC y el sector agrícola, posteriormente, Se presenta el contexto teórico en términos del pensamiento sistémico, la dinámica de sistemas y la lógica difusa y finalmente, la ingeniería de software, la instrumentalización electrónica y la tecnificación de cultivos.

3.2.1. TIC en el sector agrícola colombiano

El sector agrícola colombiano es uno de los principales sectores productivos del país por su contribución al PIB, del orden del 17,3%, su generación de empleo y la amplitud de las zonas rurales de Colombia. Aunque el aporte es grande, la agricultura no ha crecido en igual proporción como otros sectores en la economía colombiana, ya que posee retos en términos de tecnificación, competitividad y productividad agrícola (MinTIC, 2021).

Con base en lo anterior, el Ministerio de las TIC ha previsto que estas tecnologías pueden consolidarse como un factor de competitividad y reducción de pobreza en este sector. Por esta razón, el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (mintic.gov.co, 2018) ha comenzado a implementar lo siguiente:

- Desarrollo de aplicaciones relevantes para la mejora de la productividad y los ingresos de los agricultores.
- Consolidación de las plataformas públicas de información del sector Agrícola, en atención a las necesidades de los agricultores.
- Apoyo de las TIC para un mejor acceso a los servicios de extensión para agricultores.

- Apropiación de TIC para agricultores y población rural, mediante la implementación de la certificación de campesino digital, y aprovechamiento de los Kioscos Vive Digital para el desarrollo de habilidades TIC.

3.2.2. Pensamiento Sistémico y Dinámica de Sistemas (DS) de Jay W. Forrester

El pensamiento sistémico es un tipo de corriente que busca comprender el funcionamiento de un sistema, es decir, busca tener una visión del mundo en términos de totalidades a diferencia del método científico tradicional que busca aislar las variables de un sistema y estudiarlo por partes (Andrade, Dyner, Espinosa, & López, 2001). Este pensamiento acompañado de la metodología DS son importantes en las distintas áreas del conocimiento social, de informática o cibernética entre otros, para analizar y modelar el comportamiento temporal en entornos complejos; es decir que, se basa en la identificación de los bucles de realimentación entre los elementos, y también en los retardos en la información y material en el sistema.

Así, podemos entender el sistema como un conjunto de elementos que se encuentran interconectados de manera inherente, donde esta conectividad es la vitalidad estudio de un fenómeno.

3.2.3. Lógica Difusa

Esta se basa en lo relativo de lo observado como posición diferencial, este tipo de lógica toma dos o más valores del sistema, contextualizados y referidos entre sí, esta se utiliza cuando la complejidad del proceso en cuestión es muy alta y no existen modelos matemáticos precisos, para procesos altamente no lineales y cuando se envuelven definiciones y conocimiento no

estrictamente definido (Zatarain, 2011). Cabe mencionar que la lógica difusa deriva de la lógica tradicional, y es más cercana a la forma del pensamiento humano.

3.2.4. Ingeniería de Software

Es una disciplina que busca garantizar el correcto funcionamiento de un software antes de ponerlo en funcionamiento. Está orientada en el desarrollo, operación y mantenimiento del software a partir del análisis de la situación, el uso de estructuras, enfoques sistémicos, matemáticas, ciencias de la computación y diferentes herramientas para hacer pruebas de software (Systems group., s.f.)

Las pruebas buscan comprobar diferentes aspectos de un software y aportar datos sobre su correcto funcionamiento. La empleabilidad de estas pruebas, que están divididas en dos clases: pruebas estáticas (pruebas que no corren el código de la aplicación) y las pruebas dinámicas (pruebas que si corren el código de la aplicación), en el mismo sentido, dependiendo del enfoque técnico que tengan las pruebas pueden ser (Lee, 2020):

3.2.5. Pruebas de caja negra:

Es el componente por el cual se estudia el elemento desde las entradas y salidas que contienen, sin tener en cuenta su funcionamiento interno, es decir, se verifica que las funciones son operativas.

3.2.6. Pruebas de caja blanca:

Estas pruebas se centran directamente en el código, en detalles procedimentales del sistema software, es decir se busca probar que cualquier flujo de ejecución devuelve un valor correcto.

3.2.7. Testing aleatorio:

Son pruebas aleatorias enfocadas en distintos objetivos y etapas del software, tiene que ver con el usuario en el sentido que buscan simular el entorno e identificar posibles “errores”

3.2.8. La Instrumentación Electrónica

Esta trata “sobre el diseño, realización y uso de sistemas electrónicos para la medición de magnitudes eléctricas y no eléctricas los campos fuertemente ligados son las ciencias de la medición y la adquisición de datos” (D. University, sf). Este proyecto reemplazará el sitio de medición por un modelo matemático que simule los procesos reales. Es decir, que las condiciones reales de los campos se expresaran matemáticamente para que así el proyecto pueda llegar a ser un paso intermedio a la aplicación en entornos reales.

Los procesos de reemplazo de entornos reales para la realización de ensayos y optimización de procesos en la industria química son realizados por (HYSYS-MATLAB LINK - File Exchange - MATLAB Central, sf). A diferencia de esta interrelación, el proyecto busca probar la adquisición, registro de datos y toma de decisiones desde un aplicativo web. Sin embargo, lo anterior se da bajo la consideración de que los sistemas de ambientes reales monitoreados desde campo abierto son aquellos que intercambian una gran cantidad de materia y energía con el exterior; elementos como la temperatura o la presión atmosférica, influyen en los datos obtenidos debido a la interrelación que entre el campo de cultivo y el entorno exterior (Prieto, 2019).

3.2.9. Tecnificación de cultivos

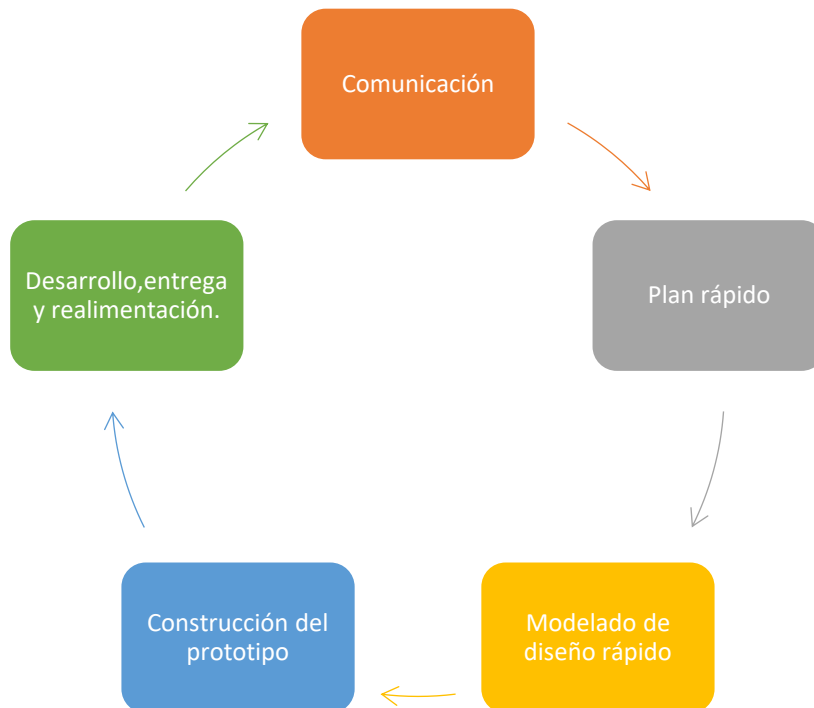
Los cultivos tradicionales sin fertirriego o con sistemas de riego básicos, son cultivos que históricamente se han establecido en condiciones de suelo y clima favorables, sin embargo, cuando estas condiciones cambian se observa una notable desventaja. Es ahí donde la

tecnificación de un cultivo puede impactar positivamente, pues engloba en su realización un conjunto de técnicas modernas como el uso de invernaderos, sistemas de riego por goteo, el estrés hídrico, variedades genéticamente modificadas e implementación de dispositivos electrónicos de medición, que permiten al agricultor tener mayor control y entendimiento de las necesidades de su cultivo y por lo tanto gestionar mejor sus recursos (Prieto, 2019).

4. Metodología

Para dar cumplimiento al objetivo general y los objetivos específicos planteados en el documento, este proyecto se desarrollo a partir de una metodología por prototipos, la cual consta de 5 etapas principales la cuales son etapa de comunicación, etapa de plan rápido, etapa de modelado de diseño rápido, etapa de la construcción del prototipo y por último etapa de desarrollo, entrega y realimentación como se muestra en la figura 1.

Figura 1 Metodología por prototipos



Nota: Autor 2023

A continuación, se describirá como se desarrolló el proyecto a partir de los diferentes prototipos realizados.

4.1 Primer Prototipo

4.1.1. Etapa de comunicación

Para el primer prototipo el director y el codirector plantearon que se debía crear una función en el back-end de la aplicación, que tuviera el mismo funcionamiento que el sistema de inferencia difuso del modelo, el cual tiene como entrada la cantidad de potasio, fosforo y nitrógeno en el terreno del cultivo.

4.1.2. Etapa Plan rápido

Para llevar a cabo lo solicitado por el director y el codirector se planteo el desarrollo de la aplicación por medio de los frameworks de angular y spring tools, de manera que angular cumpliera el rol del front-end y spring tools el rol del back-end.

Estas herramientas fueron escogidas debido a los conocimientos previos que se tenían con ambos entornos, además de que al momento del desarrollo de este proyecto existían otros proyectos en el grupo de investigación, los cuales se encontraban en una etapa más avanzada, que hacían uso de estos frameworks, lo cual facilitaba la resolución de dudas o posibles errores que surgieran.

Por lo cual para este primer prototipo se plateo en desarrollar una función que recibiera la cantidad normalizada de potasio, fosforo y nitrógeno en el suelo y la cual pudiera ser llamada como una API que en próximos prototipos pudiera ser utilizada por el front-end.

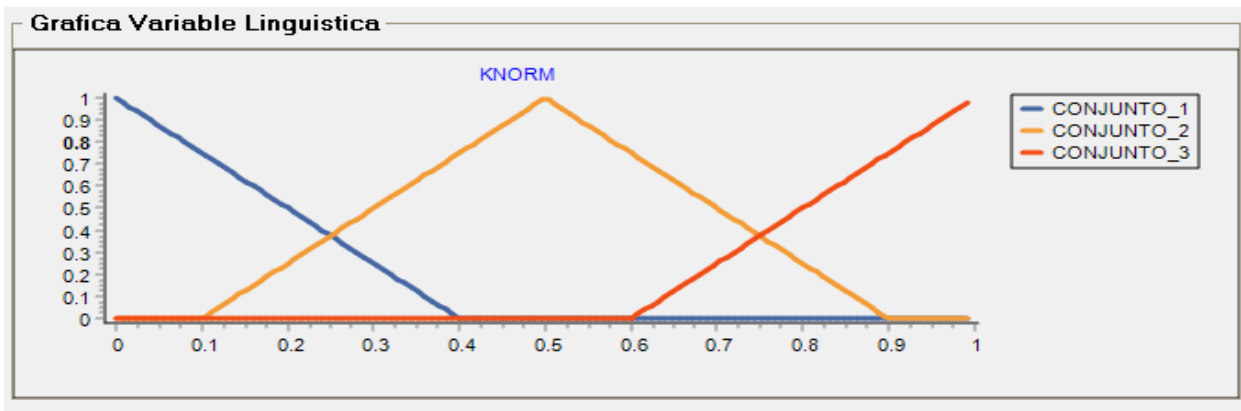
4.1.3. Etapa Modelado de diseño rápido

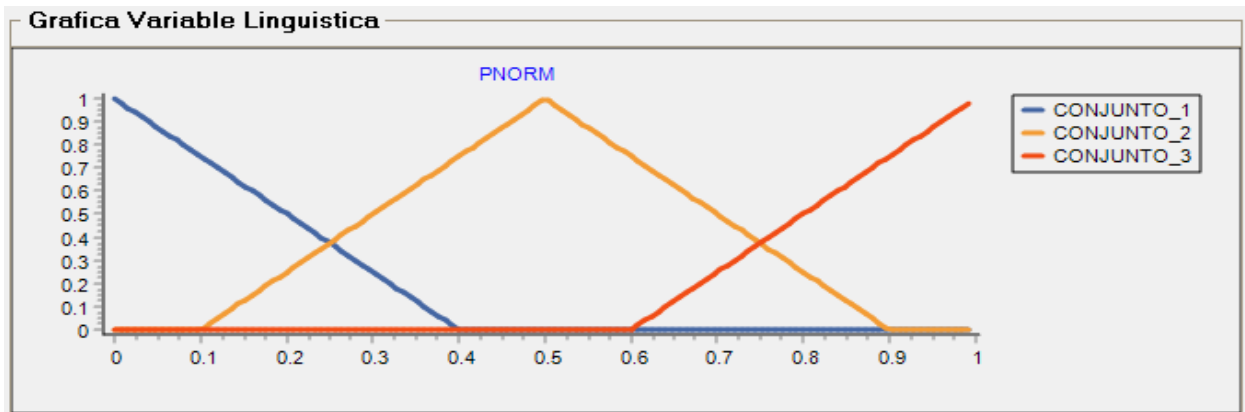
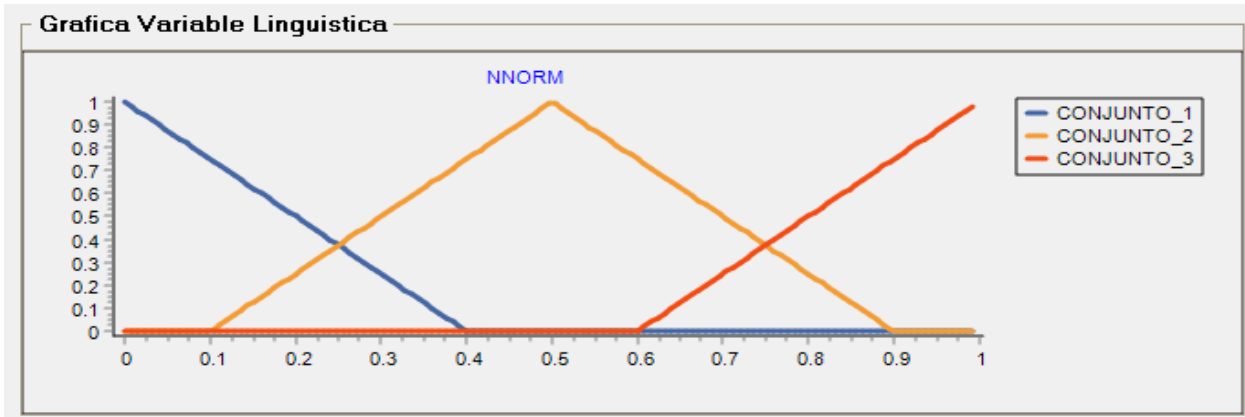
Para poder desarrollar el sistema de inferencia difuso se debió tener claro el funcionamiento que tenía dicho sistema en el software de Evolución para poder tener claro como tendría que ser el funcionamiento de la aplicación en el back-end, dicho lo anterior se determino que la función debía contar con lo siguiente para las variables lingüísticas de entrada:

- Los rangos que se considerarían bajos (conjunto_1) para el potasio, fosforo y nitrógeno serían de 0 a 0.4.
- Los rangos que se considerarían medios (conjunto_2) para el potasio, fosforo y nitrógeno serían de 0.1 a 0.9.
- Los rangos que se considerarían altos (conjunto_3) para el potasio, fosforo y nitrógeno serían de 0.6 a 1.

De manera que se formara la siguiente grafica para los tres nutrientes:

Figura 2 Graficas de variables lingüísticas





Nota: Autor 2023

Para la variable lingüística de salida, los conjuntos deberían ser los siguientes:

- Salida baja (conjunto_1), valores comprendidos entre 0 a 40.
- Salida media (conjunto_2), valores comprendidos entre 10 a 90.
- Salida alta (conjunto_3), valores comprendidos entre 60 a 100.

Dicha salida se debe regir a partir de las siguientes 27 reglas, donde B es baja, M es media y A es alta:

Tabla 1 Consolidado obtenido a partir de las graficas

	KNORM	NNORM	PNORM	NUEVA_SALIDA
1	B	B	B	B

2	M	B	B	B
3	A	B	B	B
4	B	M	B	B
5	M	M	B	M
6	A	<u>M</u>	B	M
7	B	A	B	B
8	M	A	B	M
9	A	A	B	M
10	B	B	M	B
11	M	B	M	B
12	A	B	M	B
13	B	M	M	M
14	M	M	M	M
15	A	M	M	M
16	B	A	M	M
17	M	A	M	M
18	A	A	M	A
19	B	B	A	B
20	M	B	A	B
21	A	B	A	B
22	B	M	A	M
23	M	M	A	M
24	A	M	A	M
25	B	A	A	M
26	M	A	A	<u>A</u>
27	A	A	A	<u>A</u>

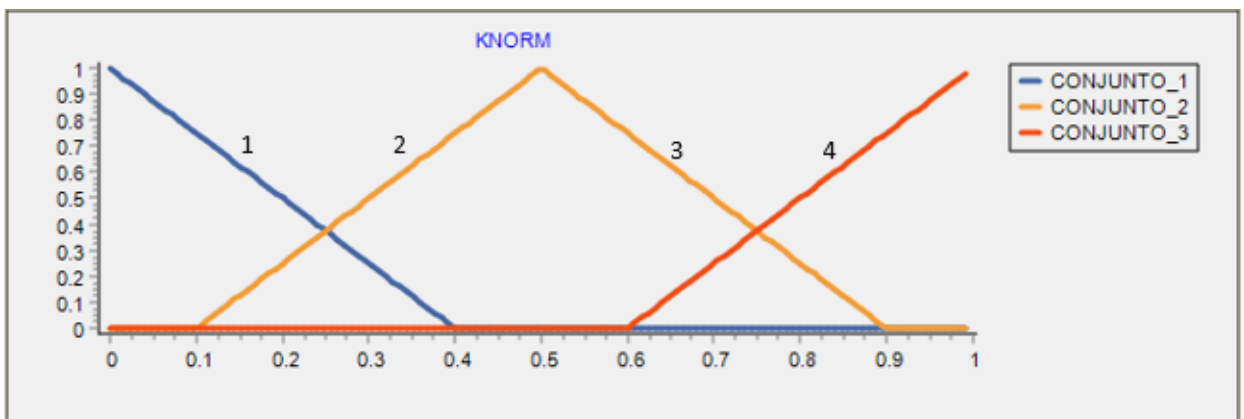
4.1.4. Etapa Construcción del prototipo

Para la construcción de la función se creo una solución particular del problema, es decir, se aprovechó que las funciones de entrada y de salida estaban conformadas por rectas y formaban triángulos que se podían descomponer en triángulos y rectángulos lo cual facilito en gran medida los cálculos que de debía realizar. Sin embargo, es posible a partir del

planteamiento realizado para este proyecto se pueda generalizar una función que permita calcular un sistema difuso más complejo.

Así como en *Software EVOLUCION* la función crea un área a partir de las variables lingüísticas de entrada, de manera que después se pueda encontrar el centroide de dicha área y finalmente dicho centroide determine el valor de salida a partir de la variable lingüística de salida.

Figura 3 Variable lingüística de salida



Nota: Autor 2023

Como se puede ver en la anterior gráfica, para la creación de las áreas se tenía un valor máximo limitado por cuatro rectas, las ecuaciones de dichas rectas son las siguientes:

1. Recta comprendida entre 0 y 0.4:

$$y = \left(\frac{-1}{0.4}\right)x + 1$$

2. Recta comprendida entre 0.1 a 0.5:

$$y = \left(\frac{1}{0.4}\right)(x - 0.1)$$

3. Recta comprendida entre 0.5 a 0.9:

$$y = \left(-\frac{1}{0.4}\right)(x - 0.9)$$

4. Recta comprendida entre 0.6 a 1:

$$y = \left(\frac{1}{0.4}\right)(x - 0.6)$$

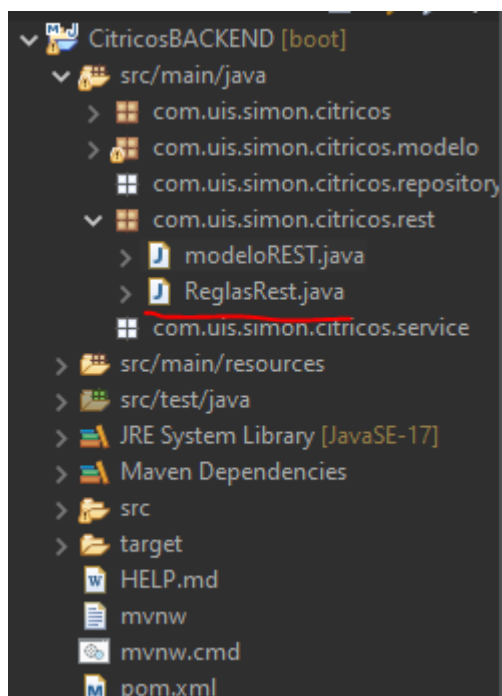
Para encontrar el centroide se cálculo a partir de la siguiente formula:

$$\bar{x} = \frac{\sum A\tilde{x}}{\sum A}$$

4.1.5. Etapa Desarrollo, entrega y realimentación

Además de crear la función que se encargara de recrear el comportamiento del sistema difuso, se creo la estructura general del back-end del proyecto la cual es la siguiente:

Figura 4 Estructura general del back-end



Nota: Autor 2023

Al mostrarle el comportamiento de la función al director y codirector del proyecto, dieron el visto bueno resaltando que se debía ver de nuevo el comportamiento con la creación del modelo completo y se procedió a la creación del siguiente prototipo.

4.2.Segundo prototipo

4.2.1 Etapa Comunicación

Se realizó una reunión con el director y el codirector donde solicitaron que el siguiente paso a seguir se debía enfocar en la creación del modelo en el back-end de manera que tuviera como entrada el largo del cultivo, el ancho, la temperatura máxima, la temperatura mínima, la cantidad de nitrógeno, potasio y fósforo en gramos y la lluvia que tiene el departamento de Santander.

4.2.2 Etapa plan rápido

Para la creación del modelo con todas las variables, se optó por realizar la función de la misma manera que se hizo el sistema difuso, es decir, una función que pudiera ser consumida como una API de manera que pudiera ser consumida por el front end de la aplicación.

4.2.3 Etapa Modelado de diseño rápido

Para la creación del modelo en el back-end, se tuvo en cuenta las recomendaciones dadas por estudiantes que habían realizado proyectos similares en el grupo de investigación, los cuales aconsejaron en realizar la creación de la estructura de la función enfocándose primero en declarar los parámetros del modelo seguidamente de inicializar los niveles, continuar con las no linealidades y las variables auxiliares y por último la declaración de los flujos, ya que de esta

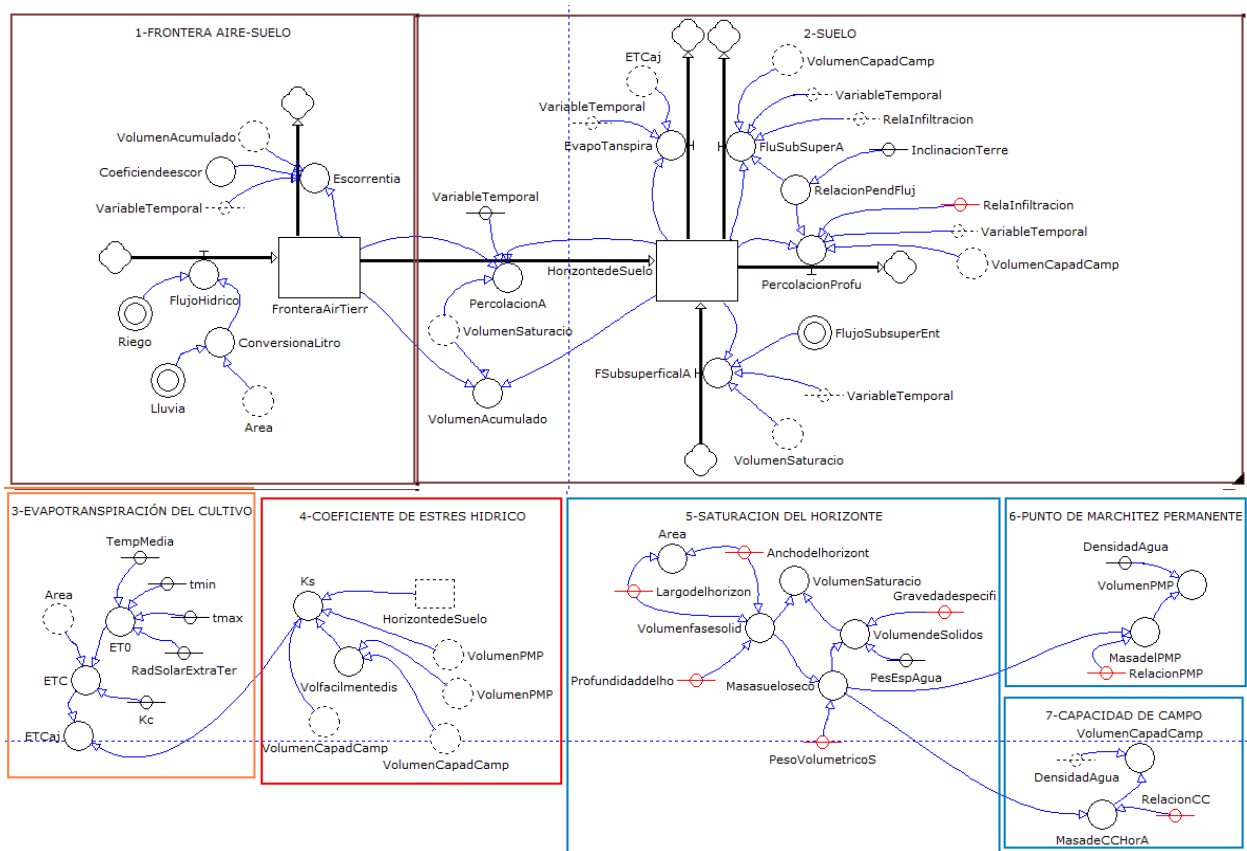
forma es que se ejecuta el modelo internamente en el software Evolución y realizarlo con otro orden puede llegar a alterar el resultado de la función en el back-end.

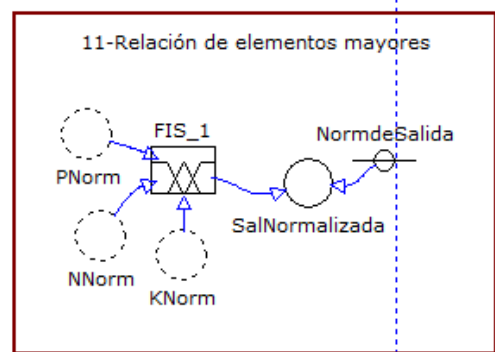
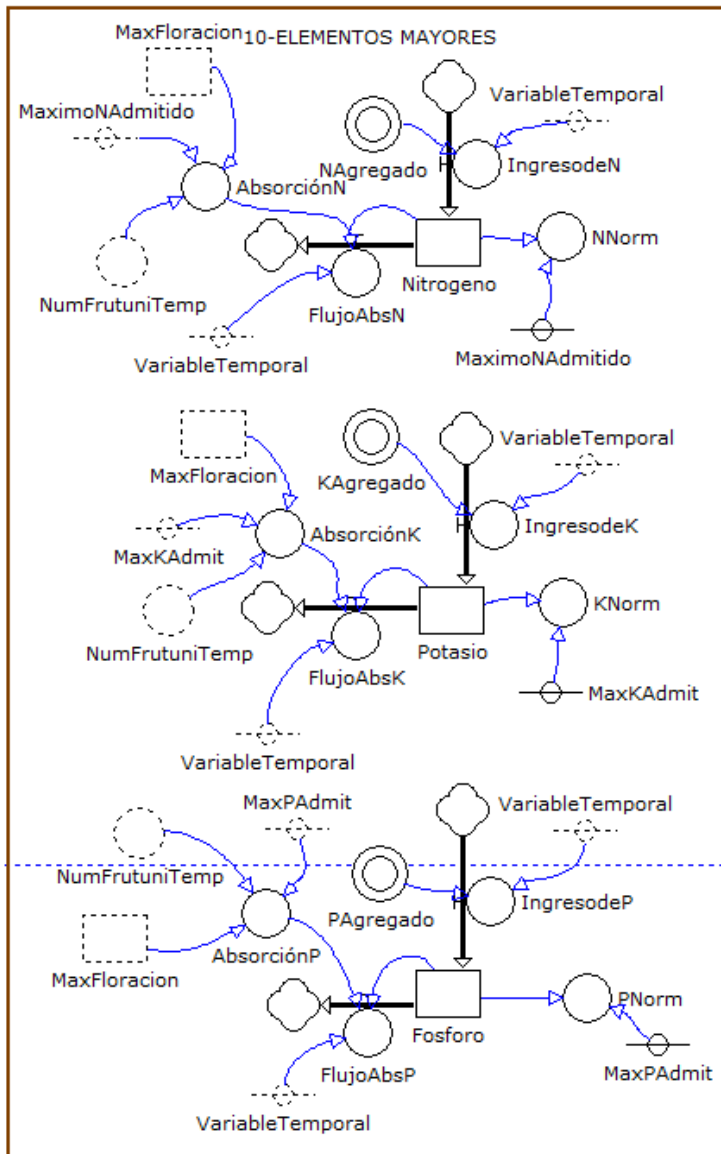
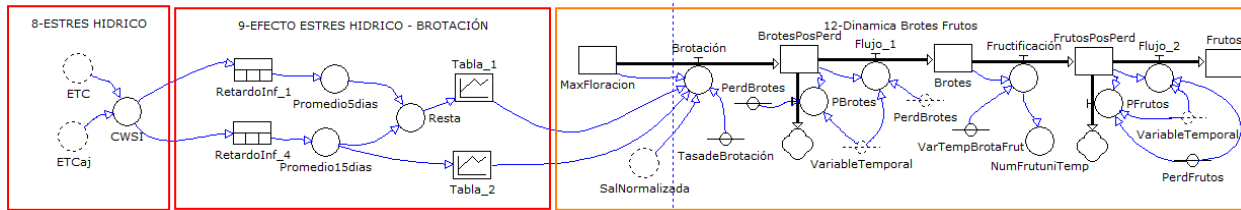
4.2.4 Etapa Construcción del prototipo

Para la construcción del prototipo se analizó el comportamiento de los 12 sectores del modelo, con el fin de entender la relación de cada uno de los elementos y saber cómo debía ser declarado cada elemento en la función.

A continuación, se muestran los sectores del modelo:

Figura 5 Sectores del modelo

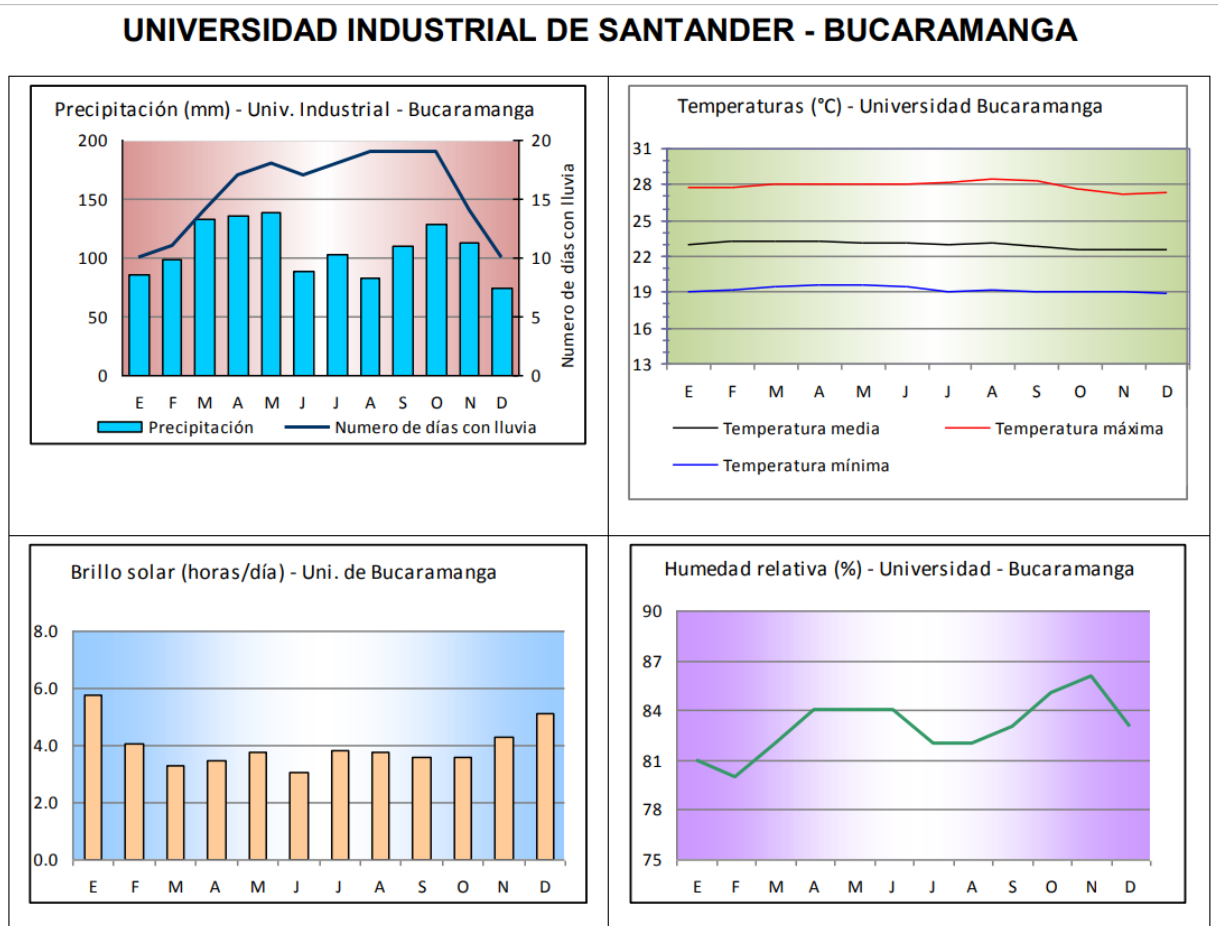




Nota: Autor 2023

Para recrear el comportamiento de la lluvia dado por la variable exogena que se encuentra en el sector 1 frontera-aire-suelo, se considerando el promedio anual de precipitaciones en la zona de Bucaramanga-Santander (IDIAM, 2022), que alcanza aproximadamente los 1303 mm. Estas precipitaciones se distribuyen en dos temporadas: las estaciones secas (diciembre, enero y febrero, con una menor proporción en junio, julio y agosto) y las temporadas de lluvia concentradas en los demás meses. Durante la temporada seca, se registra un promedio de 10 días de lluvia al mes, mientras que, en los períodos de lluvia, la cantidad aumenta a 17 o 19 días por mes. La siguiente gráfica, obtenida del IDEAM, ilustra los parámetros climáticos del área de Bucaramanga, considerando la humedad relativa, la temperatura, la precipitación y el brillo solar.

Figura 6 Referencia grafica del clima en Bucaramanga



4.2.5 Etapa Desarrollo, entrega y realimentación.

Se creó la función encargada de emular el comportamiento del modelo y se hicieron pruebas con diferentes escenarios de manera que se pudiera validar el comportamiento del modelo en el *Software* EVOLUCION y en el back-end de la aplicación, dichas pruebas unitarias se pueden ver en el anexo pruebas, dichas pruebas arrojaron como resultado que el comportamiento del back-end es similar al comportamiento del modelo en el *Software* EVOLUCION, con una pequeña diferencia en los decimales, esto debido a que el aplicativo está desarrollado en java y por tal motivo toma más decimales que en el *Software* EVOLUCION.

4.3.Tercer prototipo

4.3.1 Etapa Comunicación

Para el tercer prototipo, el director y el codirector solicitaron la creación del front-end, con dos módulos, donde el primer *modulo* debe recrear la realidad de un cultivo de cítricos, es decir, el usuario de la aplicación ingresa los datos del cultivo y al simular muestra el comportamiento del mismo sin un riego en específico; el segundo modulo debe simular a partir de diferentes frecuencias de riego en los meses del año, para que el usuario pudiera comparar los resultados del cultivo con las lluvias de Santander y el comportamiento del cultivo con diferentes frecuencias de riego.

4.3.2 Etapa Plan rápido

Como se mencionó en la sección 4.1.2, la aplicación se realizó por medio del framework angular y se hizo uso de Bootstrap en su versión 5.0 para que la aplicación creada fuera responsive.

4.3.3 Etapa modelada de diseño rápido

Para el desarrollo de la aplicación se plantearon los siguientes requerimiento funcionales y no funcionales que debía tener la aplicación:

4.3.3.1 Requerimientos Funcionales

Tabla 2 RF01-Hacer Simulaciones

ID	<i>01</i>		
Nombre	<i>Hacer simulaciones</i>		
Complejidad	<i>Alta</i>	Prioridad	
Usuarios	<i>Agricultores</i>		
Descripción			
<p><i>Los agricultores simulan con las condiciones iniciales del cultivo los cuales son:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <i>-Temperatura máxima del cultivo.</i> <i>-Temperatura mínima del cultivo.</i> <i>-Cantidad en gramos de fosforo, nitrógeno y potasio en el suelo.</i> <i>-Ancho del área en cm.</i> <i>-Largo del área en cm.</i> <i>-Tipo del suelo.</i> <i>-Lluvias de Santander.</i> <p><i>Se muestran los resultados de la simulación y quedan estáticos para poder hacer comparaciones.</i></p> <p><i>El agricultor simula con diferencias frecuencias de riego en diferentes meses, las frecuencias de riego son las siguientes:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <i>-Una vez al mes.</i> <i>-Cada tres días.</i> <i>-Cada 7 días.</i> <i>-Cada 14 días.</i> 			
Consideraciones			
<i>-Las gráficas de las condiciones iniciales del cultivo deben permanecer sin cambios para</i>			

que se puedan hacer comparaciones con los diferentes tipos de riego.

-El agricultor debe conocer el tipo de suelo y la cantidad de nutrientes que tiene el suelo antes de la simulación.

4.3.3.2 Requerimientos no funcionales

Tabla 3 RNF01 - Interfaz de usuario

Identificación del requerimiento:	<i>RNF01</i>	Prioridad del requerimiento:	
Nombre:	<i>Interfaz del usuario</i>		
Descripción del requerimiento:	<p><i>La aplicación debe ser desarrollada para ser ejecutado en un ambiente web, debe ser amigable e intuitiva para el usuario, el diseño se caracteriza por ser “Responsive” a fin de garantizar la adecuada visualización en múltiples computadores personales, dispositivos tableta y teléfonos inteligentes. Además, el sistema debe permitir su navegación a través de los exploradores más comunes como Mozilla Firefox, Internet Explorer, Chrome y las diferentes plataformas (Windows, Mac, Linux).</i></p> <p><i>El navegador no debe requerir ninguna modificación o instalación de plugins, applets, o similares para que el software funcione, ni requerir soporte técnico al usuario para poder operar la aplicación.</i></p>		

Tabla 4 RNF02 - Disponibilidad

Identificación del requerimiento:	<i>RNF02</i>	Prioridad:	5
Nombre	<i>Disponibilidad</i>		
Descripción del requerimiento:	<i>La disponibilidad de la aplicación deberá ser permanente pero también dependerá de la disponibilidad del proveedor de acceso a</i>		

	<i>Internet o de los servicios de interconexión prestados por terceros.</i>
--	---

Tabla 5 RNF03 - Desempeño

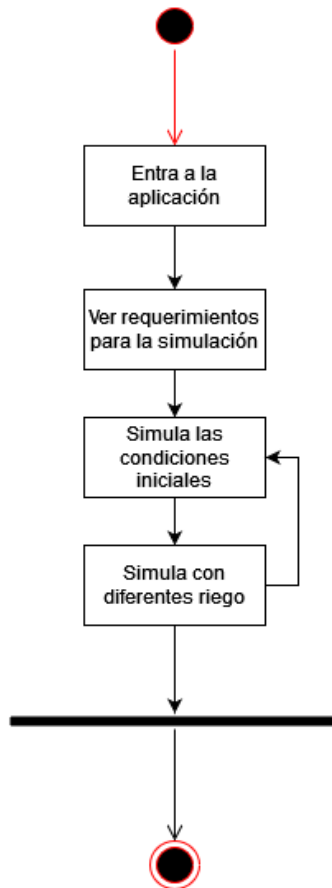
Identificación del requerimiento:	<i>RNF03</i>	Prioridad:	5
Nombre	<i>Desempeño</i>		
Descripción del requerimiento:	<p style="text-align: center;"><i>Los tiempos de respuesta relacionados al manejo de formularios, en forma general, no debe ser superior a 3 segundos dentro de la red de la UIS.</i></p> <p style="text-align: center;"><i>El despliegue de informes y consultas dependiendo de su complejidad media, se espera que no exceda un tiempo de 5 segundos, sin embargo, teniendo en cuenta la simulación quizá se muestre en tiempo real esta debe tomar un tiempo prudente pero que no sobrepase el minuto de respuesta</i></p> <p style="text-align: center;"><i>Lo anterior se debe poder obtener en un ambiente tecnológico controlado, que permita tener recursos de procesamiento, almacenamiento y comunicaciones disponibles solo para el sistema.</i></p>		

Nota: Autor 2023.

Y se planteó el siguiente diagrama de actividades, que represente el funcionamiento del aplicativo por parte del usuario:

4.3.3.3 Diagramas de casos de uso

Figura 7 Diagrama de actividades



Nota: Autor 2023.

4.3.4 Etapa Construcción del prototipo

Para la construcción de este prototipo, se decide agregar una pantalla de inicio donde se muestre información relevante y llamativa para los posibles usuarios, donde se agregan las siguientes secciones:

- ¿Cómo funciona el simulador?: sección que contiene un párrafo corto donde se describe grosso modo el funcionamiento de la herramienta tecnológica.

- ¿Qué necesita saber antes de simular?: sección que contiene información de los conocimientos y datos de cultivos que debe tener el usuario antes de realizar la simulación.

Después de haber agregado esa vista inicial, se procedió con la parte funcional del prototipo, donde se procede a crear un módulo a partir de un formulario, el cual se encargará de solicitarle al usuario los siguientes datos: el tipo del suelo y el diámetro del área en la que se va a cultivar; considerando a su vez, la cantidad de sustratos presentes en este como Nitrógeno, Potasio y Fosforo en la medida de gramos (g), como se muestra en la siguiente figura:

Figura 8 Datos del cultivo

Datos del cultivo-Primer simulador

Este simulador recrea el comportamiento de un cultivo de citricos partiendo de las condiciones climáticas que tiene la ciudad de Bucaramanga en el departamento de Santander, ingrese los datos de su cultivo en el siguiente formulario y después seleccione el botón de simular.

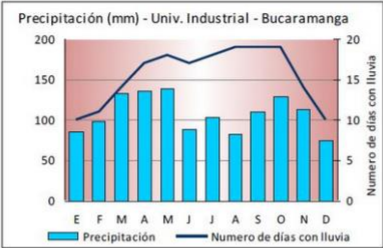


Gráfico de precipitación (mm) y número de días con lluvia en Bucaramanga. El eje X muestra los meses (E, F, M, A, M, J, J, A, S, O, N, D). El eje Y izquierdo muestra la precipitación en mm (0 a 200) y el eje Y derecho muestra el número de días con lluvia (0 a 20). La precipitación se muestra como barras azules y el número de días con lluvia como una línea azul.

Mes	Precipitación (mm)	Número de días con lluvia
E	85	10
F	100	12
M	135	15
A	140	18
M	140	18
J	90	15
J	80	15
A	110	18
S	135	18
O	135	18
N	115	15
D	75	10

Largo del area de estudio(cm):

Ancho del area de estudio(cm):

Temperatura máxima del cultivo(C°):

Temperatura mínima del cultivo(C°):

Tipo de suelo:

Cantidad de Nitrogeno en el suelo (g):

Cantidad de Potasio en el suelo (g):

Cantidad de Fosforo en el suelo (g):

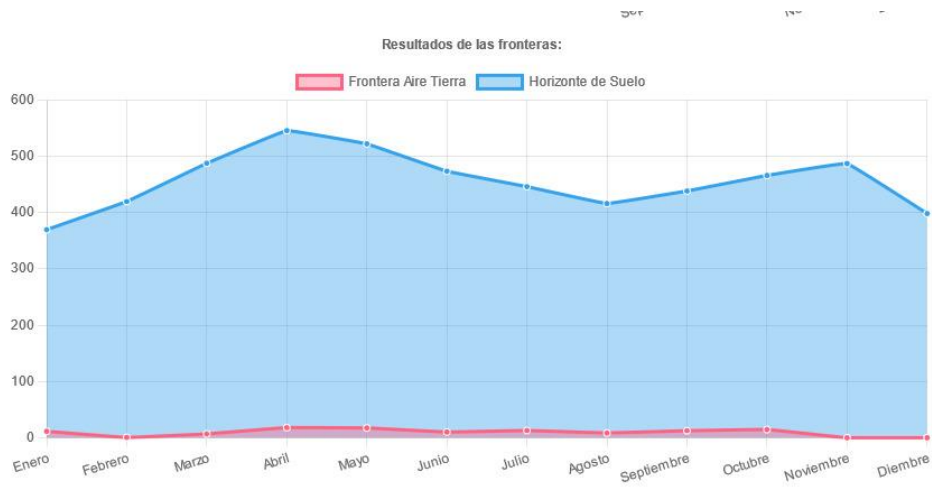
Nota: Autor 2023, simulación inicial, datos reales del cultivo.

Como se evidencia en la figura 4, la propuesta grafica de diseño para este prototipo se realizó desde una perspectiva consciente de las necesidades de los usuarios con diversos niveles de conocimiento tecnológico, garantizando así que cualquier usuario independientemente de su experiencia en tecnología, pueda utilizar la herramienta de manera óptima.

Una vez ingresados los datos necesarios el usuario procede a simular, es ahí donde el simulador le muestra al usuario una serie de graficas en las cuales se prevé la cantidad de brotes, frutos y floración que tendrá dicho cultivo, al igual que los niveles de nutrientes y agua presentes en el suelo a través de los meses como se muestra a continuación:

Figura 9 Comportamiento del cultivo simulador inicial





Nota: Autor 2023, predicción inicial con base en la realidad.

A partir de los resultados iniciales que reflejan la situación actual del cultivo, el usuario tiene la posibilidad de realizar ajustes en la frecuencia y la cantidad de riego mensual. Esta capacidad le permite adquirir un conocimiento más profundo o predecir con mayor eficacia las cantidades de frutos, brotes y la floración del cultivo. Además, es factible determinar en qué mes se producirá un incremento o disminución en cada una de estas variables.

Figura 10 Datos del cultivo ajustados por el usuario

Datos del cultivo-Segundo simulador

Este segundo simulador esta pensado para recrear diferentes escenarios teniendo en cuenta la frecuencia de riego y la cantida de agua que se le aplicara al cultivo por el método de goteo, tenga en cuenta que para esta versión del software se asumira que el arbol tiene una edad de 2 a 5 años.

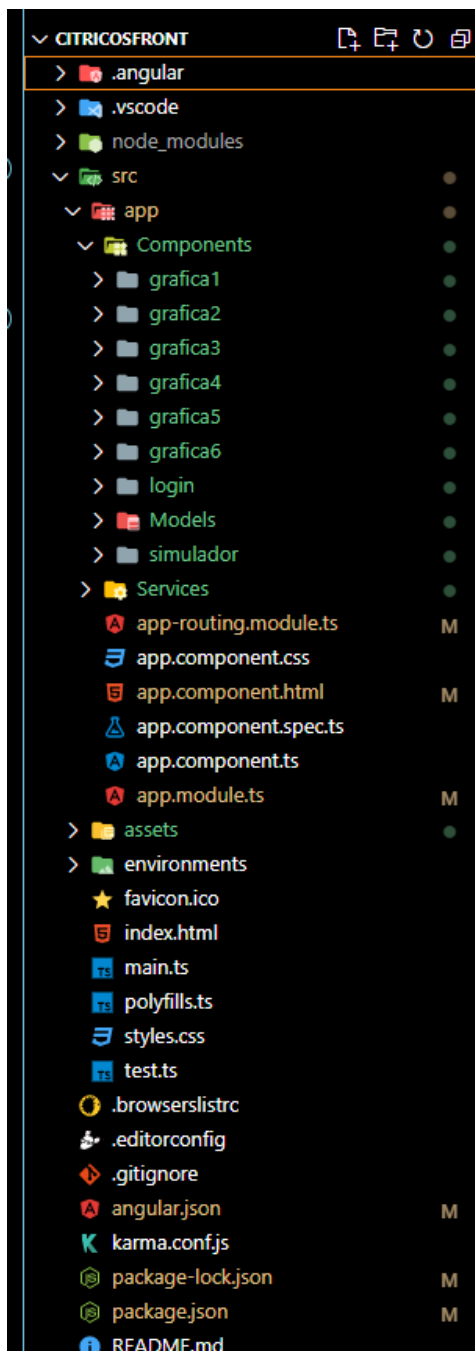
Mes	Frecuencia de riego	Cantidad de agua(L)
Enero	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Febrero	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Marzo	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Abril	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Mayo	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Junio	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Julio	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Agosto	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Nota: Autor 2023, datos variables “manejo” del agricultor.

4.3.5 Etapa Desarrollo, entrega y realimentación.

Para el desarrollo de este prototipo, se realizó la siguiente estructura en Angular:

Figura 11 Estructura en Angular



Nota: Autor 2023

A continuación, se explica el funcionamiento de cada componente:

- Grafica 1, 2, 3: Estas graficas se encargan del comportamiento del cultivo en las condiciones “reales”, es decir, el comportamiento del cultivo con las condiciones iniciales del cultivo sin el riego.
- Grafica 4, 5, 6: Estas graficas se encargan de mostrar el comportamiento del cultivo al aplicar diferentes tipos de riego o al cambiar los datos iniciales de la simulación.
- Login: este componente inicialmente estaba pensando para ser un login de la aplicación, pero ya que la aplicación no va a guardar nada en base de datos, se decidió que fuera un modulo informativo del funcionamiento del simulador.
- Models: es la carpeta donde se encuentran los modelos que se usan para enviar los datos a las API'S del back-end.
- Simulador: es el componente en donde se alojan las gráficas y el formulario que se utilizan para la simulación del cultivo.
- Services: es la carpeta donde se encuentran los servicios que se encargan de llamar las API'S del back-end de la aplicación.

4.4.Cuarto prototipo

4.4.1. Etapa comunicación

Para el cuarto prototipo se realizo una reunión con el director y el codirector, los cuales expusieron la necesidad de crear un segundo simulador el cual no tomara por defecto las lluvias en Santander, con el fin de mejorar la experiencia de los usuarios y expandir las posibilidades de usar el simulador para usuarios de todo el territorio colombiano.

4.4.2. Etapa plan rápido

Una vez definida la necesidad de crear un nuevo simulador, se llevó a cabo una planificación rápida para establecer los cambios que se necesitaban realizar al simulador actual para poder reutilizar el código y agregar las nuevas funcionalidades, donde se llegó a la conclusión que se debía agregar una variable que le indicara al back-end cuando iba hacer solicitada la función que se encarga de la simulación por parte del primer simulador o por parte del segundo, de manera que para el primer caso se tomara el comportamiento de las lluvias en el departamento de Santander y el segundo caso se tomara el comportamiento de las lluvias ingresadas por el usuario, es decir, la cantidad de días de lluvia de cada uno de los meses del año y la cantidad de lluvia reportada en cada mes en milímetros de agua (mm).

4.4.3. Etapa modelada de diseño rápido

En esta etapa, se comenzó a diseñar el nuevo simulador, donde se decidió cambiar el requerimiento funcional RF01 para especificar que ahora las simulaciones también se podrán realizar contemplando la lluvia de otros sectores del país, por lo cual el requerimiento funcional quedó de la siguiente manera:

Tabla 6 RF01 Actualizado

ID	<i>01</i>		
Nombre	<i>Hacer simulaciones</i>		
Complejidad	Alta	Pr	ioridad
Usuarios	<i>Agricultores</i>		
Descripción			
<i>Los agricultores tendrán dos simuladores donde podrán simular de la siguiente manera: Simulador 1</i>			

- Temperatura máxima del cultivo.
- Temperatura mínima del cultivo.
- Cantidad en gramos de fosforo, nitrógeno y potasio en el suelo.
- Ancho del área en cm.
- Largo del área en cm.
- Tipo del suelo.
- Lluvias de Santander.

Simulador 2

- Temperatura máxima del cultivo.
- Temperatura mínima del cultivo.
- Cantidad en gramos de fosforo, nitrógeno y potasio en el suelo.
- Ancho del área en cm.
- Largo del área en cm.
- Tipo del suelo.
- Cantidad de días de lluvias al mes.
- Cantidad de agua (mm).

Para ambos simuladores se muestran los resultados de la simulación y quedan estáticos para poder hacer comparaciones.

El agricultor puede simular en ambos simuladores con diferencias frecuencias de riego en diferentes meses, las frecuencias de riego son las siguientes:

- Una vez al mes.
- Cada tres días.
- Cada 7 días.
- Cada 14 días.

Consideraciones

-Las gráficas de las condiciones iniciales del cultivo deben permanecer sin cambios para que se puedan hacer comparaciones con los diferentes tipos de riego.

-El agricultor debe conocer el tipo de suelo y la cantidad de nutrientes que tiene el suelo antes de la simulación.

-Para el segundo simulador, el usuario debe conocer la cantidad de días y la cantidad de agua que llovió en cada mes.

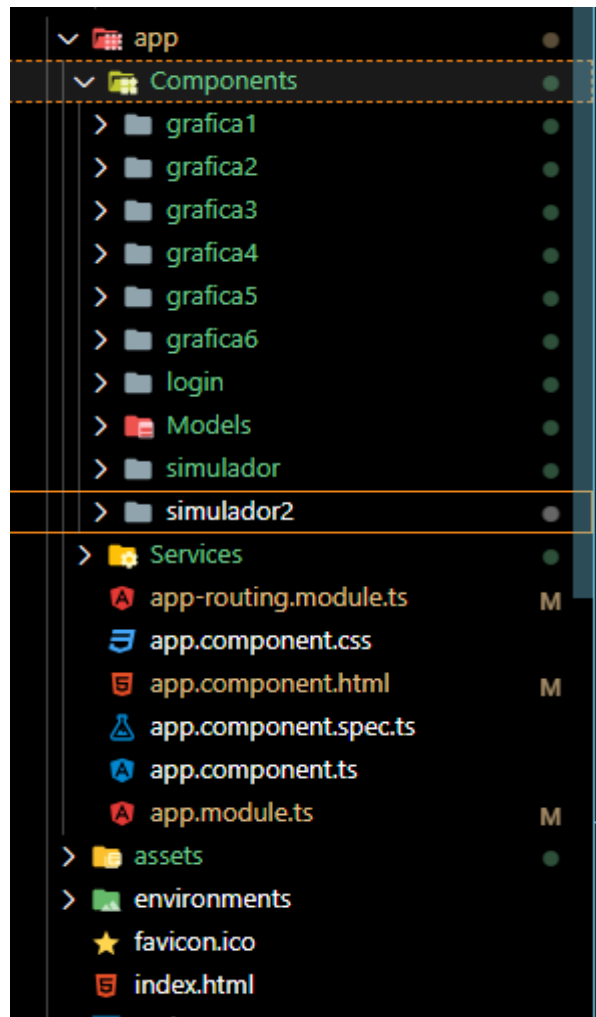
4.4.4. Etapa construcción del prototipo

Con el diseño planteado, se procedió a la construcción del prototipo en un nuevo componente del proyecto, se agregaron los campos encargados del comportamiento de las lluvias en el formulario y se procedió a reutilizar el código del primer simulador.

4.4.5. Etapa desarrollo, entrega y realimentación

Para la creación de este segundo simulador, se reutilizo el código del primer simulador adicionando como se mencionó en los numerales anteriores, gracias al funcionamiento por componentes de angular se reutilizaron las gráficas del primer simulador por lo cual la estructura del proyecto quedo de la siguiente manera:

Figura 12 Estructura en Angular



Nota: Autor 2023

Donde simulador N°2, es el componente encargado de simular la tendencia del cultivo, teniendo en cuenta el comportamiento de lluvia anual que ingrese el usuario.

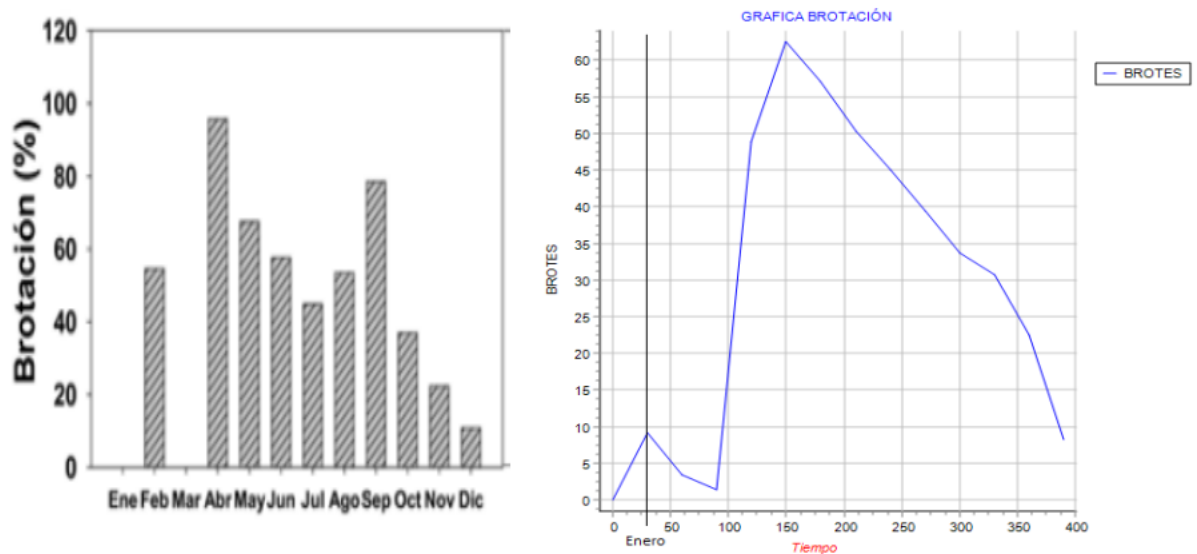
Al terminar con la creación de este prototipo se le presento al director y codirector del proyecto, los cuales sugirieron que se debía proceder con la etapa de la validación del modelo teniendo en cuenta trabajos previos.

4.5. Validación del modelo

Para validar el modelo desarrollado en este proyecto y evaluar su concordancia con el comportamiento del fenómeno real, se procedió a comparar los datos proporcionados por el simulador del proyecto con los datos presentados en el índice 13 de validación sobre trabajos previos como se muestra en el trabajo (Andrade & Mojica, 2021). Además, se calculó el error de manera análoga a la metodología empleada en dicho trabajo previo.

Con base en lo anterior, se presenta inicialmente el desarrollo grafico del ejercicio de validación realizado por (Andrade & Mojica, 2021) :

Figura 13 Grafica de validación del desarrollo del cultivo en trabajos previos



Nota: grafica comparativa del porcentaje del fenómeno real con los resultados de simulación (Izq. Valores observados; Der. Valores simulados) Retomada de: (Andrade & Mojica, 2021),

Ahora bien, en la siguiente representación gráfica, se puede evidenciar el desarrollo del cultivo dispuesto para un ciclo anual realizado en el presente proyecto;

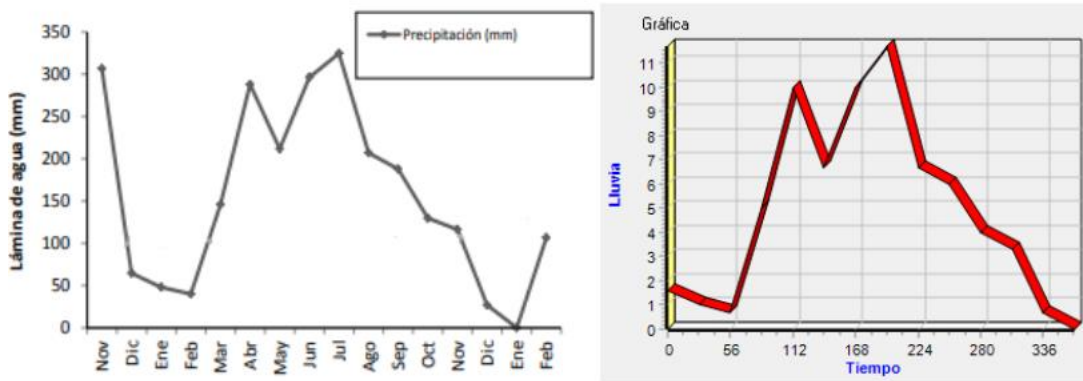
Figura 14 Graficas de validación en un ciclo anual



Nota: Autor 2023.

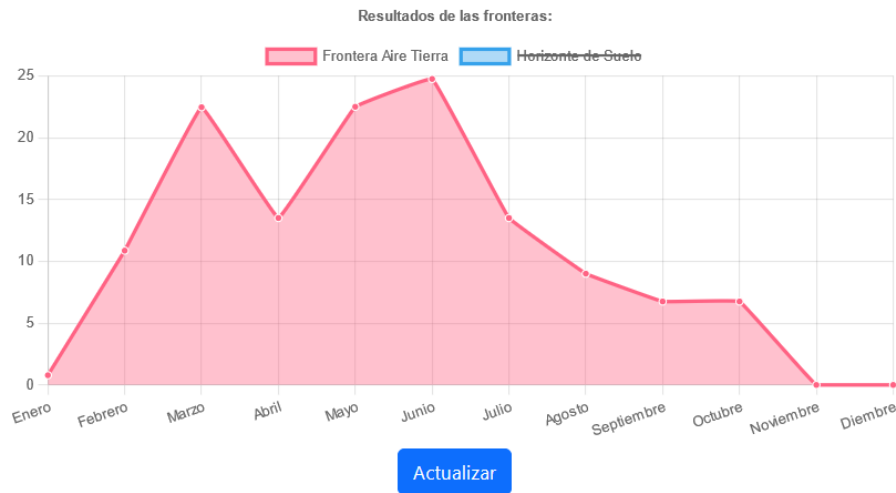
Continuando con esta línea de análisis comparativo entre los datos recopilados en trabajos anteriores y los datos obtenidos en el curso de este proyecto, se presentan las siguientes representaciones gráficas relacionadas con las mediciones pluviométricas:

Figura 15 Grafica de validación de los datos pluviométricos en trabajos previos



Nota: grafica de la alternancia de la producción y comportamiento denológico. Retomada de: (Andrade & Mojica, 2021)

Figura 16 Grafica de validación 2



Nota: Autor 2023, validación del “comportamiento real”

Como se puede apreciar en las representaciones gráficas presentadas, el desarrollo del cultivo a lo largo de un ciclo anual de simulación exhibe una respuesta cualitativamente homóloga en ambos gráficos. En virtud de lo anterior, se podría inferir que el proceso de validación se encuentra en consonancia con los parámetros previamente establecidos en el ámbito de las variables incorporadas para la simulación.

Desde una perspectiva numérica se realizó el siguiente cálculo del error, contemplando los resultados de la simulación:

Figura 17 Valores para la validación del error

```
[20.201269678160024, 6.712074309152392, 51.796780343812436, 97.53035297117214, 96.11244138290752, 80.93732745860588, 67.90074409147314, 58.80834513296808, 53.00031264402849, 49.33640172983247, 38.70004979187082, 12.858640430950775, 4.272412153292845, 1.4195517563169584,
```

Nota: Autor 2023 cálculos de error

Tabla 7 Datos reales y del simulador

VALORES DE	VALOR SIMULADOR
------------	-----------------

REFERENCIA

AÑO 2009		
FEB	54	6,712
ABR	100	97,530
MAY	91	96,112
JUN	81	80,937
JUL	72	67,9
AGO	63	58,808
SEP	80	53
OCT	50	49,336
NOV	37	38,7
DIC	14	12,858

Nota: Autor 2023

Ecuación 1 Calculo del error de los resultados de simulación respecto a los datos reales

$$\begin{aligned}
 Error \approx & ((54 - 6.712) + (100 - 97.530) + (91 - 96.112) + (81 - 80.937) \\
 & + (72 - 67.900) + (63 - 58.808) + (80 - 53) + (50 - 49.336) \\
 & + (37 - 38.7) + (14 - 12.858))/10
 \end{aligned}$$

$$Error \approx 8.0107\%$$

Nota: Autor 2023

En resumen, los resultados reales presentados en este documento son sometidos a un proceso de comparación y análisis en el contexto de una simulación que abarca un ciclo anual, donde se realiza un cálculo del “error” con el promedio de las muestras obtenidas. Cabe destacar que este modelo se concibe como un enfoque aproximado al fenómeno real de los cultivos, siendo una herramienta valiosa para respaldar la toma de decisiones orientadas hacia la mejora del desarrollo de dichos cultivos.

5. Prototipo final

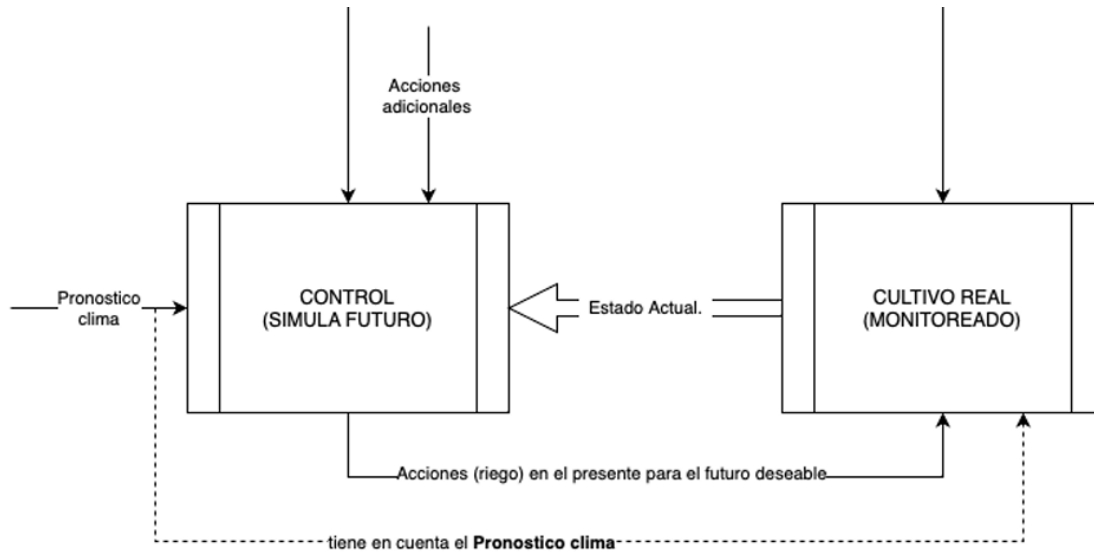
5.1. Etapa de comunicación

Para el prototipo final se realizaron ajustes en relación con la toma de decisiones del riego del cultivo, con el fin de cumplir el objetivo propuesto para la realización del ambiente web; lo cual permitió controlar el cultivo partiendo de las acciones de monitoreo, para así finalmente lograr una la optimización con base en las diferentes condiciones y las metas de producción. Es decir que con este último prototipo se pudo obtener el control del riego logrando una cantidad de frutos en un tiempo determinado.

5.1.1. Etapa de plan rápido

Con base en lo anterior, se realizó el siguiente gráfico, el cual representa el funcionamiento en la aplicación propuesto por H. Andrade. donde cada rectángulo representa una instancia del modelo (MS-DSD-GA) (Andrade & Mojica, 2021). La simulación de cada modelo se realiza de manera independiente, pero compartiendo información mutuamente, para lo cual se plantearon una serie de variables de entrada en la simulación.

Figura 18 Representación del funcionamiento del ambiente web



Cabe destacar que, para esta versión del software el “CULTIVO REAL” será la primera simulación que se realiza con el software y el cual representa las condiciones iniciales del cultivo, antes de simular con diferentes tipos de riego.

5.1.2. Etapa de diseño

En esta etapa se propone la utilización de un pseudo código que cuente con las siguientes variables:

Tabla 8 Constantes

<i>Constantes</i>	
<i>Lluvia</i>	<i>Pronostico del clima (ver gráfico anterior)</i>
<i>Lluvia Real</i>	<i>será proporcionada por el cultivo real (monitoreado),</i>

<i>Cantidad de Frutos deseados</i>	<i>Se debe ingresar la producción de frutos que se pretende alcanzar</i>
<i>Rango de Producción</i>	<i>Se debe ingresar la fecha en la cual se pretende realizar la cosecha de la producción</i>
<i>Variables</i>	
<i>Riego</i>	<i>Esta variable es tomada del modelo (MS-DSD-GA)</i>
<i>Riego Optimo</i>	<i>Riego que se debe realizar para alcanzar producción de frutos que se pretende alcanzar</i>
<i>Riego Optimo []</i>	<i>Registro de riegos óptimos</i>
<i>Cultivo Real</i>	<i>Apunta a una instancia del cultivo real (monitoreado)</i>
<i>Estado Actual</i>	<i>Conjunto de parámetros que representan un flujo de información en un momento dado del cultivo real únicamente</i>
<i>Control</i>	<i>Apunta a otra instancia del cultivo conocida como: Control (Simula futuro)</i>
<i>Resultado Cultivo Real []</i>	<i>Registro de resultados del cultivo real</i>
<i>Funciones</i>	
<i>modelo (Riego, Lluvia [], estado Actual, tiempo De Simulación)</i>	<i>Función de modelo que simula el crecimiento del cultivo, crea una instancia del modelo (MS-DSD-GA)</i>

5.2. *Etapa de optimización del cultivo*

El modelo propuesto utiliza bucles anidados para simular el crecimiento del cultivo ajustando el riego hasta alcanzar la cantidad deseada de frutos para lograr las metas de producción.

```
while(dia<rangoDesProduccion){  
  
    riego=0  
    control=0  
    resultadoFrutos=0  
  
    while(cantidadFrutosDeseados>resultadoFrutos[dia]){  
  
        control=modelo(riego,lluvia[dia],estadoActual,360)  
        resultadoFrutos[dia]=control.frutos[dia]  
        riegoOptimo=riego  
        riego=riego+nLitrosAgua#Serealizaajusteenelriego  
  
        }#ControlSimulaFuturoúnicamenteenestewhile  
  
        riegosOptimos[dia]=riegoOptimo#Accionesenelpresenteparaelfuturodeseable  
        cultivoReal=modelo(riegoOptimo,lluviaReal[dia],estadoActual,dia)#CultivoReal(monitoreado)  
        estadoActual=cultivoReal.estadoActual  
        dia=dia+15  
    }  
    resultadoCultivoReal[ ]=cultivoReal.frutos  
    returncultivoReal
```

5.3. *Montaje del Aplicativo Web en Servidores del Grupo SIMON*

Durante esta fase se llevó a cabo el montaje del Aplicativo web en el servidor Grupo SIMON, con el respaldo del administrador del servidor del grupo de investigación, se realizaron los siguientes pasos por cada uno de los componentes de la aplicación:

5.3.1 Back-end

Se realizó una preparación de los archivos requeridos para el montaje del back-end que contempla el código fuente con sus respectivos modelos y servicios, y además el archivo de configuración de Maven para garantizar la compatibilidad con Java 17 y las dependencias de Spring Boot, el API quedó desplegado en la siguiente url: <https://simon.uis.edu.co/citricos/simuCultivo/simuCultivo/>.

5.3.2 Front-end

Teniendo en cuenta que el front-end está realizado en Angular en su versión 13.2.3, se realizó la preparación de los archivos requeridos para el posterior montaje en el servidor, llevado a cabo mediante la configuración del servidor web Nginx y su respectiva dockerización, por parte del administrador del servidor del grupo SIMON. La url en donde quedó desplegado el front-end de la aplicación es la siguiente: <https://simon.uis.edu.co/citricos/>

6. Conclusiones

- El proyecto ha logrado desarrollar exitosamente un simulador en ambiente web basado en el modelo de dinámica de sistemas de Andrade y Mojica (2021). Este simulador permite a los usuarios recrear diversos escenarios para cultivos de cítricos, facilitando la observación y comprensión de las condiciones bajo las cuales el cultivo alcanza los mejores resultados. De esta manera, los agricultores pueden tomar decisiones informadas para maximizar la producción mientras minimizan los costos asociados al uso del agua y otros insumos. Este logro no solo demuestra la viabilidad del modelo de simulación dinámico sistémico difuso en aplicaciones reales de gestión agrícola, sino que también establece una base sólida para futuras mejoras y adaptaciones del simulador.

- El aplicativo web se estructura en un front-end intuitivo y un back-end centrado en APIs, diseñado específicamente para facilitar futuras integraciones con sensores en un cultivo real. Esto permitirá la incorporación de actualizaciones en tiempo real sobre las condiciones del cultivo. Al hacerlo, el simulador brindará a los agricultores acceso a información precisa y oportuna que potencie la toma de decisiones efectivas y mejora significativamente las operaciones agrícolas. Esta configuración preparará el terreno para una transición fluida hacia una agricultura más conectada y automatizada.
- El uso de la metodología de prototipos fue esencial para el éxito del desarrollo del simulador web. Este enfoque iterativo permitió una mejora continua y adaptativa del proyecto, comenzando con la conversión del modelo dinámico sistémico del *Software EVOLUCION* a una API más versátil en Spring Boot, lo que facilitó su integración en un entorno web. Gracias a esta metodología, cada fase del desarrollo se ajustó de manera progresiva para atender mejor las necesidades del usuario final y mejorar la funcionalidad del sistema.
- El desarrollo de los tres prototipos de simuladores que se encuentran en la aplicación web final representa una herramienta valiosa para el aprendizaje agronómico. A través del primer simulador, que utiliza datos de lluvias históricas de Santander en 2019, los agricultores pueden entender cómo las condiciones climáticas similares a su entorno pueden afectar los cultivos. El segundo simulador permite experimentar con diversas condiciones de lluvia, ofreciendo a los usuarios la capacidad de anticipar cómo diferentes escenarios podrían impactar sus cultivos. Finalmente, el tercer simulador enseña a los agricultores a ajustar sus estrategias de riego para alcanzar metas específicas de

producción. Cada simulador fortalece la toma de decisiones basada en aproximaciones, mejorando la capacidad del agricultor para gestionar eficazmente su cultivo bajo diversas condiciones ambientales.

7. Trabajo futuro

- Para la continuación del proyecto, es recomendable que se realice una implementación del simulador con sensores en un cultivo real, los cuales proporcionen información del cultivo real sobre condiciones climáticas, calidad del suelo y otros factores relevantes, con el fin de calibrar y mejorar la precisión de las simulaciones, lo cual ayudaría a los agricultores a tomar decisiones más acertadas en la gestión de sus cultivos.
- Implementar un módulo que ofrezca recomendaciones personalizadas sobre prácticas de manejo agronómico basadas en los resultados de las simulaciones. Este módulo podría sugerir ajustes en técnicas de cultivo, uso de fertilizantes, manejo de plagas y enfermedades, la cual sería alimentada por los diferentes usuarios de la aplicación y ayudaría a crear un entorno colaborativo.
- Crear módulos educativos que utilicen el simulador como base para enseñar principios de agronomía y gestión de cultivos. Estos podrían ser utilizados en programas de formación para estudiantes del Instituto IPRED.
- Agregar una funcionalidad que permita no solo validar diferentes riegos para llegar a una producción deseada sino también las condiciones óptimas de los nutrientes del suelo para minimizar el gasto hídrico que puede requerir el cultivo.

Referencias Bibliográficas

- Andrade, H., & Mojica, J. (2021). *Propuesta de modelo de simulación dinámico-sistémico difuso para la gestión del ciclo productivo de plantaciones agrícolas aplicado el ciclo fenológico de cítricos*. Bucaramanga. Recuperado el Febrero de 2022
- Andrade, H., Dyner, I., Espinosa, A., & López, H. (2001). *Pensamiento Sistémico*. . Bucaramanga: Ediciones Universidad Industrial de Santander.
- Campecino.com, E. (13 de Mayo de 2019). Obtenido de <https://elcampecino.co/cultivo-de-limon-tahiti-una-buena-oportunidad-productiva-para-colombia/>
- D. University. (sf). *Electronical Instrumentation*,. Obtenido de https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Reader_ET8017_Electronic_Instrumentation__Chapter1.pdf.
- HYSYS-MATLAB LINK - File Exchange - MATLAB Central. (sf). Obtenido de <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/72357-hysys-matlab-link>
- Martinez, N., & Andrade, H. (2016). *Integración de la Lógica Difusa a la Dinámica de Sistemas para la selección de terrenos de cultivos agrícolas*. Elemenos 6. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/320600667_Integracion_de_la_Logica_Difusa_a_la_Dinamica_de_Sistemas_para_la_seleccion_de_terrenos_de_cultivos_agricolas
- Prieto, D. (2019). *La tecnificación como herramienta para incrementar la productividad agropecuaria en colombia*. Bogotá: FUA.

Systems group. (s.f.). *La ingeniería de software ¿Qué es y que tiene?* Obtenido de <https://systemsgroup.es/tecnologias-de-la-informacion/la-ingenieria-de-software-que-es-y-que-utilidad-tiene/32363/>

Wassermann, S. (1994). *El estudio de casos como método de enseñanza* . Amorrortu editores.

Zatarain, O. (2011). *Lógica Difusa*. Mexico D.F: UAEH.