

PROPUESTA DE MODELO DE SIMULACIÓN DINÁMICO SISTÉMICO DIFUSO
PARA LA GESTIÓN DEL CICLO PRODUCTIVO DE PLANTACIONES
AGRÍCOLAS, APLICADO AL CICLO FENOLOGICO DE CÍTRICOS.

JOSE LUIS MOJICA ESTRADA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA

2021

PROPUESTA DE MODELO DE SIMULACIÓN DINÁMICO SISTÉMICO DIFUSO
PARA LA GESTIÓN DEL CICLO PRODUCTIVO DE PLANTACIONES
AGRÍCOLAS, APLICADO AL CICLO FENOLOGICO DE CÍTRICOS.

JOSE LUIS MOJICA ESTRADA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar título de
Magister en Ingeniería de Sistemas e Informática

Director:

Prof. Hugo Hernando Andrade Sosa.
Magister en Ingeniería de Sistemas e Informática.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA

2021

DEDICATORIA

A mis padres Bizaida Estrada Arroyo y Luis Crisanto Mojica Corzo.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi gratitud a Dios por todas las bendiciones recibidas, a mis padres quienes han sido guía y ejemplo en el camino de la vida. A mis familiares por todo su cariño. Al profesor Hugo Andrade por enseñarme el pensamiento sistémico, la complejidad de los fenómenos, el modelado y la simulación, así como su asesoría y asistencia para el desarrollo de este proyecto. Al profesor Alfonso Diaz por sus aportes al modelo de simulación y su colaboración en el desarrollo del sistema de inferencia difuso. A los profesores Omar Pinzón y Alexander Reatiga quienes aportaron en mi formación durante mis estudios de pregrado y me han honrado con su amistad. A cada ser humano que trabajando por un mundo mejor y aportó de forma directa o indirecta al desarrollo de este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1 OBJETIVOS	16
1.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.2 OBJETIVO ESPECIFICO	16
2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	17
3 ESTADO DEL ARTE	18
4 MARCO TEÓRICO	24
4.1 DINÁMICA DE SISTEMAS	24
4.2 LÓGICA DIFUSA	25
4.3 SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSO (FIS).	25
4.3.1 Fusificador	26
4.3.2 Dispositivo de inferencia difusa	26
4.3.3 Defusificador	26
4.4 INTEGRACIÓN DE DINÁMICA DE SISTEMAS Y LÓGICA DIFUSA	26
4.5 EVOLUCIÓN (SOFTWARE)	27
5 METODOLOGÍA	28
6 COMPORTAMIENTO GENERAL DE SUELO.	31
6.1 TIPOS DE SUELO.	31
6.2 LOS HORIZONTES DE SUELO	32
7 COMPORTAMIENTO HÍDRICO	34
7.1 LA LAMINA DE RIEGO EN MILÍMETROS (MM)	36
7.2 RELACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CAMPO (CC) Y PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE (PMP) SEGÚN EL TIPO DE SUELO.	37
8 CICLOS DE REALIMENTACIÓN DEL MODELO	39

8.1 CICLOS DE REALIMENTACIÓN.	42
9 MODELO DE DINÁMICA HÍDRICA-FLORACIÓN	44
9.1 PREMISAS DEL MODELO DE SUELO.	46
9.2 JUSTIFICACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN.	46
10 MODELO DE SIMULACIÓN DE SUELO.	48
10.1 VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE PARÁMETROS.	49
10.2 SUSTENTO EN LA LITERATURA.	51
10.3 RUDIMENTOS DEL PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN DE PARÁMETROS POR CONDICIONES EXTREMAS.	55
10.4 VARIABLES EXÓGENAS.	56
10.5 EJEMPLO DEL PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN DE PARÁMETROS.	57
10.6 EVALUACIÓN DE PARÁMETROS.	58
10.7 EVALUACIÓN DE UNIDADES.	60
10.8 VALORES TEÓRICOS RECOMENDADOS.	61
11 FLORACIÓN	63
11.1 MODELO DE FLORACIÓN.	63
11.2 VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS	64
11.3 SUSTENTO EN LA LITERATURA.	66
11.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.	68
11.5 EVALUACIÓN DE UNIDADES.	70
11.6 SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSO.	71
12 APLICACIONES EN ENTORNOS REALES	75
12.1 GESTIÓN Y USO EFICIENTE DE RIEGO	75
12.2 GESTIÓN PRODUCTIVA POR RIEGO MANUAL.	75
12.3 RIEGO AUTOMÁTICO (CONTROLADOR ON/OFF BASADO EN MODELO EXTERNO)	76
12.4 REGULACIÓN BÁSICA DE LA PRODUCCIÓN ASOCIADA PARA LA ATENCIÓN DE UN MERCADO	79
12.5 OTRAS APLICACIONES	80
13 VALIDACIÓN SOBRE TRABAJOS PREVIOS.	81

14. CONCLUSIONES	86
CITAS BIBLIOGRÁFICAS	88
BIBLIOGRAFÍA	99
ANEXOS	112

LISTA DE FIGURAS

	Pag
Figura 1. Metodología de Investigación.	29
Figura 2. Metodología de los 5 lenguajes.	30
Figura 3. Horizontes de suelo. Tomado de módulo 1 Calculo de la lámina de riego	33
Figura 4. Fases hídricas del suelo.	36
Figura 5. Lamina de riego en milímetros (mm) en el perfil de suelo	37
Figura 6 Capacidad de campo y punto de marchitez permanente	38
Figura 7. Diagrama de influencias del modelo de simulación de suelo.	39
Figura 8. Ciclos de realimentación de la brotación y floración de cítricos.	40
Figura 9. Modelo de dinámica hídrica-floración	45
Figura 10. Modelo de simulación de suelo	49
Figura 11. Análisis de sensibilidad del parámetro Ancho del Horizonte	58
Figura 12. Diagrama de Flujos y Niveles con Sistema de Inferencia Difusa para modelado de la floración en cítricos.	64
Figura 13. Variables de entrada Sistema de Inferencia Difuso (FIS_1)	73
Figura 14 Izquierda: Gráfico 3D Relación Difusa, Eje x: Fosforo, Eje y: Potasio, Eje z: Salida. Derecha: Grafica 3D Relación Difusa. Eje x: Fosforo, Eje y: Nitrógeno, Eje z: Salida	74
Figura 15. Diagrama general de sistema de control automático ON/OFF	77
Figura 16. Estructura causal básica para la producción agrícola asociada	79
Figura 17. Comparativa de datos pluviométricos externos y datos ingresados al modelo de simulación.	81
Figura 18. Comparativa de porcentaje del fenómeno real con resultados de simulación (Izquierda: Valores observados, Derecha: Valores simulados).	82
Figura 19 Resultados de bienales de brotación en naranja valencia.	83

Figura 20. Resultados de simulación basados en datos pluviométricos reales para el año 2009- 2010

84

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Nombres diagrama de influencias.	41
Tabla 2. Ciclos de realimentación del diagrama de influencias	42
Tabla 3. Rango de valores de parámetros	51
Tabla 4. Justificación de la estructura del modelo de simulación.	52
Tabla 5. Valores fijos de evaluación de parámetros	55
Tabla 6 Valores de variables exógenas	56
Tabla 7 Resultado de la evaluación de parámetros mediante análisis de sensibilidad.	58
Tabla 8. Comprobación de unidades modelo de suelo	60
Tabla 9. Referencia teórica aproximada de valores de suelo	62
Tabla 10. Valores Máximos y mínimos de los parámetros de floración.	65
Tabla 11. Sustento en la literatura de floración para la construcción del modelo.	66
Tabla 12. Valores en el modelo al momento de realizar el análisis de sensibilidad	68
Tabla 13. Inspección del análisis de sensibilidad de la zona de floración del modelo de simulación.	69
Tabla 14. Inspección de unidades de la zona de floración del modelo de simulación.	70
Tabla 15. Ecuaciones del modelo de simulación	112

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexos A Ecuaciones del modelo de simulación.	112
Anexos B. Vista del modelo de simulación	125

RESUMEN.

TITULO: PROPUESTA DE MODELO DE SIMULACIÓN DINÁMICO SISTÉMICO DIFUSO PARA LA GESTIÓN DEL CICLO PRODUCTIVO DE PLANTACIONES AGRÍCOLAS, APLICADO AL CICLO FENOLÓGICO DE CÍTRICOS*.

AUTOR: JOSE LUIS MOJICA ESTRADA**.

PALABRAS CLAVE: MODELO MATEMÁTICO, SIMULACIÓN, DINÁMICA DE SISTEMAS, ESTRÉS HÍDRICO, CICLO PRODUCTIVO AGRÍCOLA.

DESCRIPCIÓN:

La gestión productiva agrícola es ineficiente en muchos casos, especialmente en aquellos en los que no hay un control productivo o un mal cálculo de la lámina de riego.

Una mala gestión agrícola afecta negativamente el uso de los recursos hídricos. Así como impacta la seguridad alimentaria de una nación, debido que las plantaciones poseen un umbral productivo, el cual puede desaprovecharse en los casos que los cultivos tengan una producción no regulada.

Como propuesta de mejora de la gestión productiva, se plantea un modelo Dinamico-Sistemico de simulación de la gestión agrícola, aplicado a cultivos de cítricos que integra los ciclos de realimentación del fenómeno, construido y evaluado con la literatura agroindustrial publicada.

El modelo de simulación se construye en base al paradigma Dinamico-Sistemico integrado con lógica difusa, con el objetivo de lograr una sinergia entre los conocimientos del experto en el área agrícola y el modelo planteado, al aprovechar las características lingüísticas y complejidad no lineal de la metodología difusa.

El modelo de Dinámica de Sistemas Difuso representa el fenómeno de dinámica hídrica (Variable según las condiciones del suelo) y su causalidad en el índice de estrés hídrico y la producción de cítricos, así como su relación no lineal con algunos elementos mayores y su consumo. Las aplicaciones del modelo de simulación se plantean desde el cálculo de la lámina de riego, riego automático y gestión productiva de cultivos de cítricos.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática.

Director: Prof. Hugo Hernando Andrade Sosa, M.Sc.

ABSTRACT

TITLE: PROPOSAL OF DIFFUSE SYSTEMIC DYNAMIC SIMULATION MODEL FOR THE MANAGEMENT OF THE PRODUCTIVE CYCLE OF AGRICULTURAL PLANTATIONS, APPLIED TO THE PHENOLOGICAL CYCLE OF CITRUS FRUITS*

AUTHOR: JOSE LUIS MOJICA ESTRADA*.

KEY WORDS: MATHEMATICAL MODELING, SIMULATION, SYSTEM DYNAMICS, HYDRAULIC STRESS, AGRICULTURAL PRODUCTION CYCLE.

DESCRIPTION:

Agricultural production management is inefficient in many cases, especially in those where there is no productive control or a miscalculation of the irrigation sheet.

Poor agricultural management negatively affects the use of water resources. It also impacts a nation's food security, since plantations have a production threshold, which can be wasted in cases where crops have unregulated production.

As a proposal to improve productive management, a Dynamic-Systemic model of agricultural management simulation is proposed, applied to citrus crops, which integrates the phenomenon's feedback cycles, built, and evaluated with published agro-industrial literature.

The simulation model is built based on the Dynamic-Systemic paradigm integrated with fuzzy logic, with the objective of achieving a synergy between the expert's knowledge in the agricultural area and the proposed model, taking advantage of the linguistic characteristics and non-linear complexity of the fuzzy methodology.

The Fuzzy System Dynamics model represents the phenomenon of hydric dynamics (variable according to the soil conditions) and its causality in the hydric stress index and the production of citrus fruits, as well as its non-linear relation with some major elements and their consumption.

The applications of the simulation model are proposed from the calculation of the irrigation sheet, automatic irrigation, and productive management of citrus crops.

*Degree work

** Faculty of Physical-Mecanical Engineering. School of Systems and Computer Engineering
Director: Prof. Hugo Hernando Andrade Sosa, M.Sc.

INTRODUCCIÓN

La República de Colombia posee un gran potencial agrícola, sin embargo, el campo se encuentra poco o nada tecnificado[1]. En el caso de los cítricos, muchos productores se encuentran a la merced de las lluvias como regulador de la producción, ocasionando una sobreproducción en las épocas de lluvia y escasez durante la sequía, suscitando un uso ineficiente de la producción agrícola que afecta a productores y consumidores. Por otra parte, el sector agrícola posee la mayor demanda de agua en el país[2], lo que hace imperativo plantear modelos para la correcta gestión de los recursos hídricos que permitan su protección y uso efectivo. Son estas las motivaciones que llevan a proponer un Modelo de Simulación Dinámico Sistémico-Difuso que permita la gestión manual o automática de la producción de cítricos y el uso eficiente del agua de riego mediante la aplicación del pensamiento sistémico.

El modelo se basa en estudios previos y en el personal especializado en el área agrícola, que permitieron determinar las relaciones sistémicas existentes en el fenómeno de floración de cítricos, encontrando de forma general dos ciclos de realimentación, el primero concerniente a la relación dinámica hídrica de suelos-estrés hídrico y el segundo a la floración-nutrientes, generando dos divisiones realimentadas en la etapa de modelado.

La primera etapa corresponde a la dinámica hídrica, planteada como la interrelación de los distintos tipos de suelo, la radiación solar, la absorción hídrica de la planta, la inclinación del terreno, la evapotranspiración entre otras variables, con el objetivo de modelar el comportamiento del recurso hídrico en el suelo.

Por otra parte, se plantea una segunda etapa, en la que se representan los elementos mayores, que se han considerado en las reuniones con el personal especializado, son los mayores aportantes a la floración y posterior formación de frutos. Las interacciones de dichos elementos se han representado matemáticamente mediante no linealidades difusas, que mezclan el

comportamiento de los elementos seleccionados con múltiples reglas de inferencia difusa, construidas en base a la práctica del experto en el área agrícola.

Ambas partes del modelo de simulación son realimentadas mediante el Índice de Estrés Hídrico o CWSI (*por sus siglas en inglés*), el cual es variable según la dinámica hídrica y posee una relación sistémica con la floración, completando así las interrelaciones.

La propuesta del modelo de simulación Dinámico Sistémico- Difuso Desarrollado en este documento, cuenta con no linealidades de múltiples entradas construidas con lógica difusa y más de 200 ecuaciones diferenciales ordinarias, que complican su solución por métodos analíticos, debido a esto, resolver la matemática necesaria para obtener resultados de simulación hace parte del terreno de la computación, los métodos numéricos y el pensamiento sistémico.

Siendo esta una propuesta de modelo que plantea las bases teórico-conceptuales que cumple con las dos primeras fases del concepto de madurez tecnológica o TRL por sus siglas en inglés, iniciando la fase de investigación aplicada, se considera pertinente sin embargo aclarar que hacen falta siete fases adicionales para completar la etapa de despliegue que entregue al productor agrícola un producto totalmente aplicable para regular la producción de su cultivo. Es así como el presente proyecto no es el fin sino el principio de una investigación que permita ajustar el modelo, evaluarlo y desplegarlo como un producto terminado en entornos reales.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer un modelo de simulación Dinámico-Sistémico Difuso para la gestión del ciclo productivo de plantaciones agrícolas, aplicado al ciclo fenológico de cítricos.

1.2 OBJETIVO ESPECIFICO

- Proponer un modelo general de la gestión de ciclo productivo agrícola.
- Determinar las variables fundamentales del sistema productivo de cítricos, así como su interrelación dinámica en términos de los ciclos de realimentación del sistema.
- Formular un modelo matemático de simulación utilizando la metodología de la Dinámica de Sistemas.
- Construir un Sistema de Inferencia Difuso integrable con el modelo de dinámica de sistemas orientado a la toma de decisiones en la gestión productiva.
- Evaluar la estructura del modelo de Dinámica de Sistemas - Difuso y formular las recomendaciones para facilitar la aplicación de los resultados del proyecto en entornos reales de producción.

2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

- ¿Cuál es el modelo general que describe el comportamiento de las plantaciones agrícolas?
- ¿Es posible identificar las variables que afectan las plantaciones de cítricos a través de un modelo de simulación que integre la lógica Difusa y el enfoque Dinámico Sistémico?

3 ESTADO DEL ARTE

La Dinámica de Sistemas, lógica difusa y el desarrollo de estas en el agro, se ejecutó en [3], permitiendo al agricultor tomar decisiones antes del establecimiento del cultivo, analizando los distintos escenarios “que le permitan tomar acciones correctivas”, en esta integración se realizan sistemas de inferencia difusos para el análisis del clima, factores del suelo y su relación.

El vínculo de Dinámica de Sistemas y Lógica Difusa ha permitido realizar trabajos que se enmarcan en distintas áreas del conocimiento, como la gestión de residuos sólidos en la ciudad de Berlín (Alemania)[4], el análisis de riesgo en los proyectos de construcción[5], el estudio de la introducción de nuevas tecnologías a las cadenas de suministro[6] o la gestión de los recursos hídricos, en algunos casos, con una integración Dinámico sistémica - Fuzzy [7] o con el uso de otras integraciones alrededor de la lógica difusa buscando optimizar el agua de riego[8] y el uso del suelo para lograr mejoras socio-económicas y ambientales [9], ayudando a la toma de decisiones al evaluar su impacto en los distintos escenarios[10].

La lógica difusa también es aplicable al control, especialmente en los casos en los que se requiere transmitir el conocimiento empírico o experto para el manejo automático de dispositivos (planta) sin requerir de un modelo preciso de la planta a controlar[11], es así que la lógica difusa puede ser aplicada en dispositivos de comportamiento no lineal, como los prototipos de foto-biorreactores, encargados de mantener en parámetro el Dióxido de carbono(CO_2) y Oxígeno(O_2) para los viajes espaciales de largo alcance, los cuales no pueden ser abordados con metodologías de control clásico por el comportamiento de las variables flujo de aire e intensidad lumínica [12]. Otras aplicaciones del control difuso se centran en el sector agrícola. Es así que se han desarrollado proyectos que juntan redes neuronales, control clásico, control difuso y tecnología de posicionamiento global (GPS), para la conducción automática de tractores[13].

El estudio de las manifestaciones biológicas con relación al clima se denomina fenología[14]. La mencionada relación se encuentra asociada al ciclo productivo de las plantaciones, en el caso de los cítricos en zona tropical, debido principalmente al ciclo pluvial (ciclo de lluvias), induciendo la floración del cultivo y por ende la producción de sus frutos. En los estudios realizados a la naranja valencia esta floración se presenta en mayor medida “al inicio de la temporada lluviosa, antecedida por un periodo de déficit hídrico”, comportamiento encontrado al analizar el desarrollo del cultivo basado en la pluviometría en la zona tropical de Colombia[15], sin realizar modificaciones del ciclo fenológico de manera artificial o el uso de modelos de simulación como es objetivo de la presente investigación, sin embargo otros trabajos realizan el uso de modelos matemáticos y de simulación para la toma de decisiones y aumento del rendimiento de plantaciones [16] y el análisis fenológico de los cultivos a temperatura mediterránea como método predictivo de las plantaciones de vid[17] y uva de mesa[18]. Las investigaciones de los ciclos productivos desde un enfoque ambiental también son desarrollados, como métodos de análisis de los impactos debidos al cambio climático sobre los ciclos productivos, dados los aumentos en las temperaturas y disminución de las lluvias a fin de encontrar las modificaciones en los rendimientos de cultivos según los distintos tipos de suelo[19] y así, determinar los tipos de especies que mejor se adaptan a los nuevos escenarios, basado en proyecciones del cambio climático, validadas con información meteorológica de largo plazo [20].

Dada la estrecha relación que existe entre el estrés hídrico y el desarrollo de la floración [15], se hace necesaria su revisión, encontrando que las condiciones de déficit hídrico en plantaciones de cítricos permiten mantener el rendimiento productivo, en los casos que mencionado déficit se encuentre debidamente controlado, no obstante el valor de estrés debe determinarse según las condiciones climáticas, la especie de cítrico estudiada, entre otros factores[21]. En condiciones no controladas el déficit hídrico puede ser lo suficientemente severo para afectar el crecimiento de la planta su fenología, floración y rendimiento[22]. En otras plantaciones también es estudiado el riego deficitario especialmente en los casos

en los que se busca aumentar el rendimiento del recurso hídrico sin afectar la producción[23], en algunas plantaciones con ahorro de aproximadamente del 30.4% de agua [24]y riego deficitario con hasta el 75% del riego normal sin encontrar afectaciones significativas en la biomasa y propiedades del cultivo [25], en determinados tipos de plantaciones la deficiencia de riego contralada produce resultados positivos en comparación con los parámetros normales, tal es el caso de los cultivos de pera, los cuales presentaron un “aumento de la firmeza de la fruta, las concentraciones de sólidos solubles y la acidez de la cosecha” [26]así como las plantaciones de granada, las cuales presentaron una reduciendo del crecimiento vegetativo en la etapa temprana, posponiendo la floración y acelerando la siguiente floración, en los casos que se evitó el riego hasta la etapa de establecimiento de la fruta[27] o la remolacha, la cual muestra mejores rendimientos cuando se aplica estrés hídrico, posterior al riego normal, exponiendo, la importancia del orden de aplicación de riego normal- riego deficitario, pues el aplicar un orden contrario de riego (riego deficitario-riego normal) presento disminuciones en los rendimientos de la plantación[28]. Los beneficios del estrés hídrico no son una generalidad en las plantaciones, debido a las afectaciones producidas por este déficit, principalmente cuando es demasiado severo o no controlado , dando como resultado reducciones del rendimiento productivo, presentando mayor impacto cuando la planta es sometida a estrés hídrico antes de su floración, en comparación con el estrés inducido posterior a esta etapa[29].

Los beneficios del estrés hídrico son aprovechados de mejor manera cuando existe una regulación del riego, los parámetros de esta regulación deben ser adaptados según la especie y el clima en el que se encuentra la plantación[21] y la elección del tipo de riego y su estrategia de aplicación, según el tipo de suelo [30], Además los efectos adversos del estrés hídrico son mitigables con la aplicación de fertilizantes órgano-minerales[31] es entonces que se puede aprovechar el estrés sin afectar la producción, aumentando el rendimiento hídrico al lograr producciones similares a las obtenidas con cantidades normales riego en condiciones de déficit hídrico[32].

En un refinamiento de la ecuación de búsqueda de suelo, tierra, agua, modelado y simulación y Dinámica de Sistemas, seleccionando las publicaciones desde el año 2016 en las áreas de Medio Ambiente y Agricultura se encontraron los siguientes trabajos.

En los desarrollos de medio ambiente analizados se encontraron trabajos en la simulación de la erosión, en el cual se desarrollan mejoras de los modelos existentes, planteando modificaciones a las variables que alimentan el modelo de simulación y concluyen en mejoras de la precisión respecto al fenómeno real[33].

Desde la perspectiva agrícola se han desarrollado modelos matemáticos para la calibración de contenido de agua en el suelo aplicado a plantaciones de maíz, realizando optimizaciones de parámetros para ajustar el modelo a la realidad del fenómeno [34], también se estudia la dinámica hídrica [35] centrado en las percolaciones profundas y el ascenso capilar. Siendo la percolación base también para [36], en donde se modela el movimiento del agua en las cercanías radiculares de las plantaciones de trigo.

La Dinámica de Sistemas presenta múltiples aplicaciones en la literatura consultada, una de ellas es la comprensión del desarrollo urbano para la elaboración de políticas públicas sostenibles, en las que se incluyen políticas ambientales [37], además es aplicada en los juegos serios por su enfoque sistémico que permite analizar la sinergia entre variables como la energía, el agua, entre otras [38], siendo este enfoque sistémico el que motiva investigaciones como [7] la cual busca comprender la relación de utilidad y gastos en la industria agrícola, este mismo enfoque es aprovechado en [39] para el modelamiento del nivel del lago Issik-Kul en Asia central.

El estudio del uso de recursos hídricos en la agricultura en sinergia con Dinámica de Sistemas se presenta en el desarrollo de modelos de riego de arrozales con aguas residuales [40] y el efecto de las precipitaciones en la población arbórea y su densidad [41]. Las predicciones del aumento del consumo hídrico y crecimiento poblacional son estudiadas por [42] con un enfoque dinámico sistémico para el planteamiento de políticas agrícolas.

Otros enfoques dinámicos fueron encontrados durante la revisión de la literatura, como el estudio de la autoorganización de plantas [43] utilizando ecuaciones diferenciales parciales.

La búsqueda bibliográfica en la floración de cítricos abarca investigaciones desde el año 1989 hasta el año 2020 y analiza entre otros aspectos como la temperatura afecta el sistema reproductivo de algunas especies de cítricos, siendo precursor en la formación de flores y ovarios en plantas cítricas especialmente en el desarrollo de frutos partenocarpicos (fruto virgen sin semilla), encontrados en mayor proporción en temperaturas cálidas antes de la antesis[44], El modelado y la simulación es plantada por [45], como una metodología para estudiar el rendimiento de las plantaciones de cítricos, basado en el modelo de presupuestos de recursos planteados por *Isagi et al.* El modelado también es desarrollado en [46], con el fin de analizar el rendimiento productivo de algunas especies de cítricos y su relación causal con la meteorología, utilizando técnicas de modelado empírico, la adaptación de modelos agrometeorológicos es desarrollada por [47], para la estimación productiva de naranja valencia, basada en la producción de años anteriores, las condiciones de agua en las etapas fenológicas, entre otras. El modelado mediante el uso de datos para la previsión de los ciclos fenológicos y calidad de frutos en cultivos de cítricos usando agrometeorología es realizado por [48] , aunque similar en su objetivo general, se considera valida aclarar, que el modelamiento realizado en esta investigación incorpora variables adicionales a las meteorológicas como los nutrientes del suelo y tiene en cuenta el desarrollo no lineal del fenómeno, un desarrollo sistémico, basado en una brotación alentada por la disminución del índice del estrés hídrico (CWSI) y no por la disminución de la temperatura, aunque la temperatura sea usada en nuestro modelo de simulación como variable causal de la evapotranspiración, así como su aplicación para cultivos de cítricos en la zona ecuatorial.

La gestión en huertos de la especie *Citrus Latifolia Tanaka* es estudiada con el fin de mejorar el manejo de los cultivos en huertos usando sistemas expertos basados

en sistemas de inferencia difusa, con reglas planteadas según los conocimientos de expertos en el manejo de *Citrus Latifolia*, para mejorar la toma de decisiones[49]

4 MARCO TEÓRICO

Inicialmente conocido como Dinámica Industrial, luego Dinámica de Sistemas(DS), planteada por Jay W. Forrester, con el fin de comprender los patrones de los ciclos de operaciones y empleo en empresas del sector de la manufactura eléctrica en Estados Unidos[50]. Es ahora un lenguaje de la sistémica[51], que permite la comprensión de los fenómenos, así como su modelo matemático en ecuaciones diferenciales ordinarias, en las más diversas áreas de las ciencias y la ingeniería. Por su parte Lotfi Zadeh en su artículo[52], propone los principios de la lógica difusa, la cual es la base del desarrollo e integración de esta metodología matemática con otros campos de la ingeniería, tales como la automática, la ingeniería de sistemas, entre otras.

La Lógica difusa tiene características que la hacen pertinente para la representación matemática de los procesos de razonamiento humano, por esta razón se busca una integración que lleve el conocimiento experto a los modelos de lógica difusa. Es así como se debe llegar a la comprensión de la Dinámica de Sistemas y Lógica Difusa y de esta manera aprovechar las ventajas de las expresiones del pensamiento sistémico y las representaciones matemáticas del pensamiento humano.

4.1 DINÁMICA DE SISTEMAS

La dinámica de sistemas permite el estudio de las realimentaciones dadas en los sistemas complejos, permitiendo analizar el “comportamiento y las consecuencias de las múltiples interacciones de los elementos de un sistema a través del tiempo”, esto hace que sea conveniente para el estudio de fenómenos en los cuales se pretende estudiar, fenómenos con múltiples interacciones, comportamientos no lineales y retardos, complicando su análisis de forma analítica. Es así como los modelos de dinámica de sistemas “permiten estudiar como las políticas, decisiones, estructuras” y retardos que “influyen en el crecimiento y estabilidad de un sistema”.

Entiéndase como sistema, al “conjunto de elementos conectados entre sí, donde se enfatiza el concepto de conexión entre las entidades que lo componen”. Teniendo como esencia la conectividad, por lo tanto, los desarrollos realizados con Dinámica de Sistemas deben estar planteados en el estudio integral del fenómeno, teniendo en cuenta que “todo comportamiento de un sistema es debido a su estructura” y por tal motivo, la variación del proceder es intrínseco[53].

4.2 LÓGICA DIFUSA

Los humanos tenemos la capacidad, de comunicar nuestras experiencias “empleando reglas lingüísticas vagas” con cierto grado de incertidumbre, estas reglas, son fácilmente interpretables y hacen parte de la cotidianidad de los seres humanos, pero, difícilmente, representable mediante lógica clásica, principalmente, debido a la vaguedad que puede presentarse en los intervalos planteados en las expresiones[54]. “Cuando la complejidad de un sistema aumenta, nuestra capacidad de hacer declaraciones precisas pero significativas sobre su comportamiento disminuyen hasta que alcanzan un umbral más allá del cual precisión y significado (o relevancia) se vuelven características casi mutuamente excluyentes”[55]. Se hace preciso un desarrollo matemático que permita la representación de esta vaguedad propia del lenguaje, es así, que la lógica difusa hace frente a este desafío, mediante un conjunto de reglas que permitan realizar esta representación.

4.3 SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSO (FIS).

El sistema de inferencia difuso se encarga mediante un conjunto de pasos de tomar un valor nítido de entrada, convertirlo en difuso para su operación (Fusificador), realizar las operaciones entre los conjuntos difusos (Inferencia difusa) y por último entregar un resultado nítido de la operación de inferencia (Defusificador).

4.3.1 Fusificador:

- Esta etapa se encarga de calcular el grado de pertenencia de la variable de entrada(nítida) con el conjunto difuso, haciendo las veces de conexión de los valores numéricos de entrada con los valores lingüísticos, permitiendo, a partir del momento de la conversión, operar el valor ingresado, según la lógica difusa y las reglas si-entonces determinadas en la siguiente fase[56].

4.3.2 Dispositivo de inferencia difusa:

- Las reglas Si-Entonces, hacen parte de la relación de los conjuntos difusos asignados a la entrada y salida del Sistema de Inferencia Difuso (FIS), “Se entiende por inferencia difusa (borrosa) la interpretación de las reglas Si-Entonces con el fin de obtener las conclusiones de las variables lingüísticas de salida, a partir de los actuales valores de las variables de entrada” [56].

4.3.3 Defusificador:

- Es el proceso en el cual se convierte en un valor nítido (Número real), la operación resultan del proceso de inferencia (paso anterior) [56], este cálculo puede realizarse mediante distintas metodologías, ya establecidas, algunas de estas son centroide, biselector, medio, más pequeño y más grande de un máximo.

4.4 INTEGRACIÓN DE DINÁMICA DE SISTEMAS Y LÓGICA DIFUSA

La lógica difusa se utiliza en el modelo de simulación para representar de cierta manera el conocimiento del experto teniendo en cuenta el comportamiento de la floración de cítricos y la simplicidad que puede presentarse desde la visión cognitiva de dar explicaciones desde la semántica. Además, el modelo en Dinámica de Sistemas que representa las características dinámicas busca ser explicativo y posee una base matemática que permite integrar la lógica difusa la cual puede llegar representar las No-Linealidades con alto grado de complejidad (debido a sus múltiples entradas y salidas).

Si bien esta integración puede disminuir la exactitud desde un aspecto netamente matemático, puede enriquecer la representación del fenómeno, dada la naturaleza no lineal presente en muchos fenómenos naturales.

Con el aumento de la potencia computacional las integraciones de las ecuaciones diferenciales generadas por el proceso del pensamiento sistémico y la aplicación de Dinámica de Sistemas se ha hecho más factible realizar la integración con lógica difusa (y otras metodologías) que permiten una mejor representación de los fenómenos estudiados.

4.5 EVOLUCIÓN (SOFTWARE)

Evolución es un Software creado en el grupo de modelado y simulación (SIMON) en la Universidad Industrial de Santander, cuyo propósito es el desarrollo de modelos de simulación utilizando Dinámica de Sistemas.

Evolución cuenta con un módulo integrado de inferencia difusa, que permite aplicar y lograr sinergias Dinámico-sistémicas difusas sin el uso de software externo. Las metodologías no incluidas pueden ser agregadas mediante la creación de librerías externas que posteriormente pueden ser agregadas al modelo de simulación[57].

Si bien el módulo de inferencia difuso es un gran avance y una comodidad en la integración difusa, se recomienda actualizar el módulo, con el fin de facilitar su uso, especialmente para los usuarios que han usado otros tipos de software de amplia difusión en el campo matemático y a quienes podría dificultarse en un principio su uso.

5 METODOLOGÍA

La investigación requiere inicialmente de una revisión de literatura que permita comprender, analizar y modelar la generalidad de los ciclos productivos agrícolas, de esta manera se podrán considerar los elementos más importantes a estudiar. cuáles serán las variables exógenas, endógenas y las excluidas del modelo. Esta tarea se realiza en colaboración con expertos en el área de agroindustria que por su experticia tienen una mejor comprensión del fenómeno.

Partiendo del modelo general, se desarrolla el modelo aplicado a los cítricos, que a su vez aporte al modelo general, creando un ciclo de mejora, de lo general a lo particular y de lo particular a lo general, hasta llegar a los modelos (General y particular), que se adecuen al comportamiento del fenómeno.

La construcción del modelo se apoya en la lógica difusa, como método para aprovechar la comprensión y experticia transmitida de forma lingüística por parte del especialista en el área y de esta manera utilizar este conocimiento en el modelo, convirtiéndolo en la matemática necesaria para realizar su simulación.

El modelo desarrollado pasara por una fase de evaluación, en la cual se compruebe su correcto desarrollo, para finalmente realizar las modificaciones de las variables que simulen los distintos escenarios.

Figura 1. Metodología de Investigación.

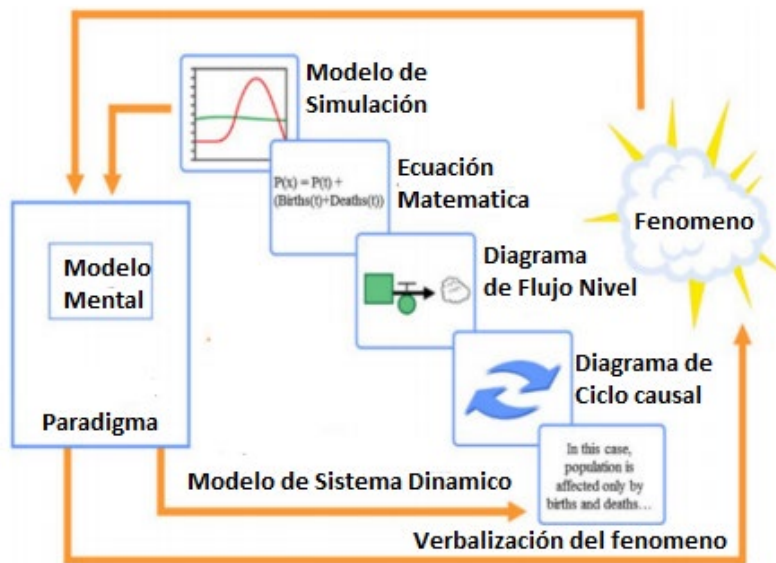


Fuente: El autor.

La construcción del modelo de simulación también se realizó utilizando una estructura realimentada, basada en la metodología de los cinco lenguajes [58]. La cual parte de la verbalización del fenómeno, donde se notó la necesidad de la aplicación del sistema de inferencia difuso en el modelo de simulación para lograr una correcta representación del fenómeno productivo agrícola aplicado a cítricos, Además parte de la esta verbalización del fenómeno fue utilizada para la construcción del sistema de inferencia difuso con la ayuda del experto en el área agrícola.

Los 5 lenguajes se fueron construyendo, siguiendo la metodología general (forma cíclica), fortaleciéndose en cada ciclo de análisis y construcción, con la ayuda del experto en el área agrícola y la revisión de literatura.

Figura 2. Metodología de los 5 lenguajes.



Fuente: R. S. Hugo Hernando Andrade Sosa, Isaac Dyner Rezonzev, Ángela Espinosa, Hernán López Garay, *Pensamiento sistémico: Diversidad en Búsqueda de Unidad*. 2001.

6 COMPORTAMIENTO GENERAL DE SUELO.

6.1 TIPOS DE SUELO

En las composiciones de la tierra se encuentran, materia orgánica, aire, minerales y agua, sin embargo, es el tamaño de las partículas minerales las que aportan la textura del suelo, aunque el suelo también puede clasificarse según las propiedades químicas tales como el pH, son las texturas de suelo, las que aportan en mayor manera en el comportamiento hídrico, debido a la relación causal directa que existe entre el tamaño de las partículas de suelo y el comportamiento del agua en él. Es así que los puntos de marchitez permanente, agua fácilmente disponible, capacidad de campo y punto de saturación, presentan variaciones según el tipo de suelo y por este motivo es necesario su análisis, para realizar los cálculos de la lámina de riego, evitando de esta manera un riego excesivo que conlleve a pérdidas hídricas, por escorrentía o percolación profunda o en el caso contrario un riego deficitario que cause estrés hídrico excesivo o que se alcance el punto de marchitez permanente (PMP) y por ende la pérdida total de la planta.

Los suelos se clasifican en tres categorías según el tamaño de sus partículas y en estado natural, pueden encontrarse como una mezcla de texturas, dando origen a suelos como los franco-arenosos o franco-arcillosos [59][60], [61], [62], aunque en general estos se clasifican en tres categorías, las cuales se presentan a continuación.

- Arena: “El suelo arenoso está compuesto por minúsculas partículas de 0.05 a 2 milímetros de diámetro”, este tipo de suelo tiene una baja retención hídrica, por este motivo se recomienda su riego frecuente, dada la baja capacidad de campo que presentan estos tipos de suelos, el agua, puede llegar fácilmente a la percolación profunda y superar la profundidad de la zona radicular, causando pérdidas en la eficiencia del riego. Es este

comportamiento de baja retención hídrica el que puede causar que muchos tipos de cultivos, especialmente los que tienen un requerimiento hídrico superior a la zona de retención máxima del suelo, que hacen los suelos mayoritariamente arenosos sean inviables para ciertos tipos de cultivo, además, este comportamiento también puede causar que estos suelos tengan un alto punto de saturación, evitando encharcamientos y propiciando el crecimiento de vegetación que requiere condiciones secas[63].

- Limo: Son suelos conformados por “arenas finas y arcillas, por este motivo, sus retenciones hídricas son mayores, facilitando que la vida vegetal prospera en ellos. Además de ser considerados suelos muy fértiles, la mezcla de partículas de arenas finas y arcillas permiten obtener los beneficios de ambos tipos de suelo, un punto de saturación mayor que el presentado en las arcillas y un buen drenaje[64].
- Arcilla: El suelo arcilloso presenta las partículas más pequeñas de los tres tipos de suelo, presentando por este motivo, una mayor retención hídrica, ocasionando que el suelo pueda conservar la humedad, pero que mencionada humedad no esté disponible para la planta, debido a la alta cohesión que se presenta entre las partículas de agua y el suelo, además “en la agricultura, el suelo arcilloso puede presentar un gran desafío principalmente debido al pobre drenaje del suelo que a su vez ocasiona un pobre intercambio gaseoso en la zona radicular[65].

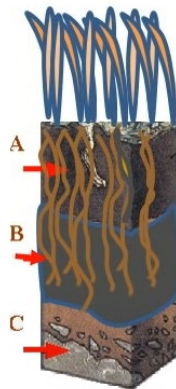
6.2 LOS HORIZONTES DE SUELO

Los suelos, aunque en apariencia su textura es homogénea, esta composición y textura varia en cuanto se aumenta su profundidad, es entonces que es posible encontrar diferentes tipos de suelo, con sus respectivas propiedades físicas y químicas, como se representa en la

Figura 3, de ahí que se modifique el comportamiento hídrico de cada horizonte y varié su capacidad de campo, punto de marchitez permanente entre otros factores. El modelo de simulación realizado en el presente trabajo se desarrolla en un horizonte de suelo, debido a su aplicación, sin embargo, en caso de requerirse, podrían agregarse nuevos horizontes desarrollados sobre el modelo base mostrado en este documento.

- Horizonte A: Horizonte más superficial, al ser el horizonte más expuesto a la atmosfera presenta mayor cantidad de materia orgánica que los demás horizontes.
- Horizonte B: Horizonte ubicado en la parte inferior del horizonte A. En este horizonte se encuentran sedimentos del horizonte superior, movidos hasta el, por la percolación del agua.
- Horizonte C: Conformado por rocas, dispuestas en fragmentos debido a las variaciones mecánicas [66].

Figura 3. Horizontes de suelo. Tomado de módulo 1 Calculo de la lámina de riego



Fuente: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Republica Oriental de Uruguay.https://www.youtube.com/watch?v=hs9edqD3eP8&ab_channel=CanalMGAP

7 COMPORTAMIENTO HÍDRICO

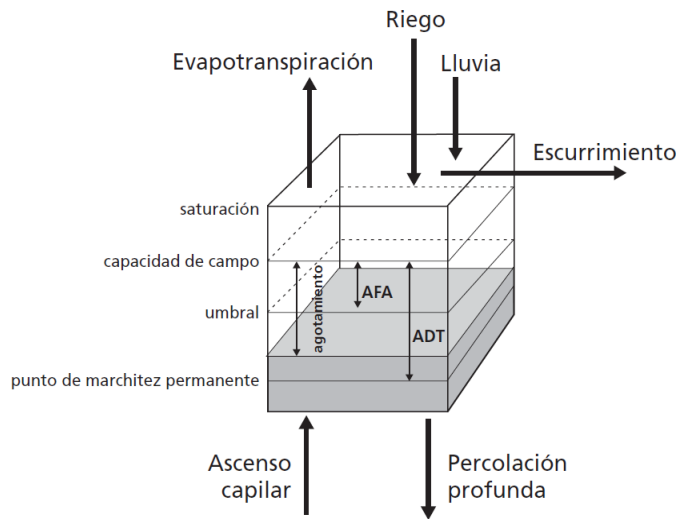
El suelo posee distintos puntos de referencia basados en su contenido de agua que son importantes para entender su dinámica hídrica, es por esta razón que es significativo comprenderlos para modelarlos, a continuación, se presentan los puntos de análisis más importantes para el modelo de suelo, desplegados de modo grafico en la Figura 4.

- Saturación: Punto en el cual prácticamente todos los espacios porosos del suelo se han llenado de agua, este proceso es transitorio y el tiempo que el suelo se encuentre saturado depende de su textura, un suelo con mayor drenaje, tendrá un tiempo de saturación menor[61],[62].
- Capacidad de campo(CC): “Cantidad de agua máxima que el suelo puede retener, medida a las 48-72 horas después de una lluvia o riego que haya saturado el suelo”[61],[62].
- Agua disponible: El agua disponible se encuentra entre los puntos de capacidad de campo y punto de marchitez permanente, entre estos dos puntos existe una subdivisión definida como el agua fácilmente disponible [61],[62],[67].
- Agua fácilmente disponible (AFA): El agua fácilmente disponible determina el estado de estrés hídrico de la planta, valores por debajo del punto de agua fácilmente disponible aumentan el estrés hídrico, sin embargo, los valores por encima del AFA son recursos hídricos fácilmente disponibles para la planta, por este motivo, no se presentan signos de estrés. En suelos con texturas livianas como las arenas, el punto de agua fácilmente disponible y las bandas de CC y PMP, pueden estar fuera de parámetro para los requerimientos hídricos de ciertos tipos de plantaciones, en suelos con texturas gruesas como las arcillas, el agua puede encontrarse más retenida

entre las partículas suelo, haciendo que se necesiten mayores cantidades de agua en la tierra para que estén disponibles para la planta[61],[62].

- Punto de marchitez permanente (PMP): “Se refiere al contenido de agua de un suelo que ha perdido toda su agua a causa del cultivo y, por lo tanto, el agua que permanece en el suelo no está disponible para el mismo”[68]
- Ascenso capilar: “La cantidad de agua que se mueve hacia arriba por ascenso capilar, desde la capa freática hacia la zona radicular, dependerá del tipo de suelo, la profundidad del nivel freático y el contenido de humedad en la zona radicular”[69] .
- Evapotranspiración: junta las acciones de la Evaporación del líquido en el horizonte de suelo debido a la acción de la radiación solar y la velocidad del viento con la transpiración por la acción fisiológica de la planta, el valor de la evapotranspiración disminuye en los casos que el nivel de agua es inferior al agua fácilmente disponible AFA.
- Ecurrimiento: Flujo superficial que se produce en los casos de suelo saturado e inclinado.
- Agua disponible total (ADT): Agua que se encuentra disponible para la absorción por las raíces de la planta.
- Riego y Lluvia: Flujos de ingreso del recurso hídrico.

Figura 4. Fases hídricas del suelo.

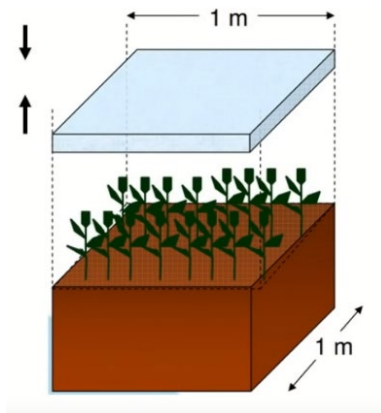


Fuente: módulo 56 FAO. <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>

7.1 LA LAMINA DE RIEGO EN MILÍMETROS (MM)

Los distintos niveles en el modelo se trabajan en litros, al igual que la variable exógena riego, sin embargo, es común encontrar que los datos de lluvia están dados en milímetros (mm). Para este fin el modelo cuenta con una conversión a litros utilizando el área superficial del perfil de suelo, tal como se observa en Figura 5, sabiendo que el área superficial de suelo es constante y la variación de la columna de agua se mide en su profundidad en milímetros, se puede realizar una desagregación de sus unidades.

Figura 5. Lamina de riego en milímetros (mm) en el perfil de suelo



Fuente: <http://www.fagro.edu.uy/~hidrologia/riego/Agua%20en%20el%20suelo%20intensivos2015.pdf>

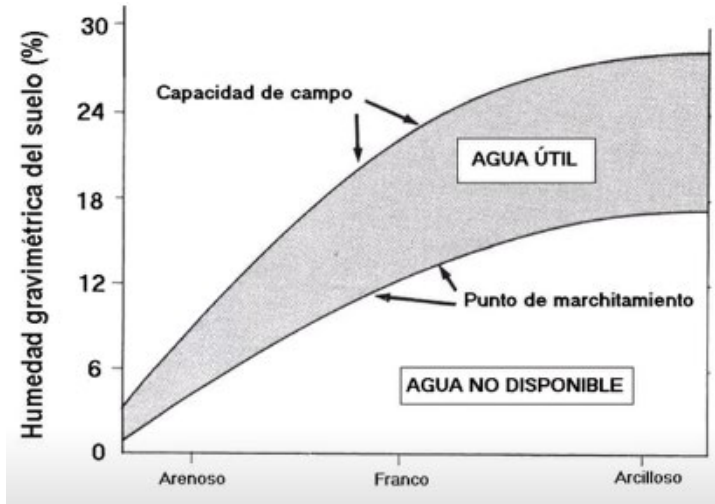
Desde el punto de vista de un sólido con área de 1 m^2 (1 metro de ancho por 1 metro de profundidad) y 1 mm de altura se puede determinar que:

$$1 \text{ mm} = 1 \frac{\text{L}}{\text{m}^2}$$

7.2 RELACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CAMPO (CC) Y PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE (PMP) SEGÚN EL TIPO DE SUELO

La capacidad de campo y el punto de marchitez permanente se modifican según la textura de suelo, por esta razón es importante modificar estos parámetros en el modelo de simulación y de esta manera obtener resultados coherentes, así mismo otros parámetros que tienen cierta dependencia con la textura de suelo deben modificarse coherentemente, consúltese la Tabla 9 para encontrar los valores teóricos recomendados.

Figura 6 Capacidad de campo y punto de marchitez permanente

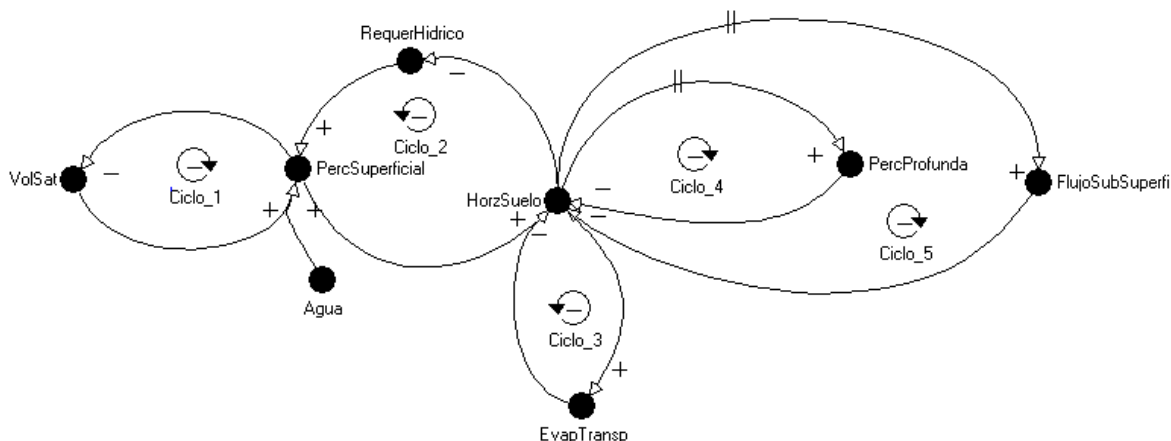


Fuente: Determinación del estado hídrico de suelo Universidad Politécnica de Valencia (UPV).

https://www.youtube.com/watch?v=kYBu_qUvZP4&ab_channel=UniversitatPolit%C3%A8cnicaVal%C3%A8ncia-U

8 CICLOS DE REALIMENTACIÓN DEL MODELO

Figura 7. Diagrama de influencias del modelo de simulación de suelo.



Fuente: El autor.

Basado en la explicación y la literatura mencionada en los capítulos 6 y 7 del comportamiento del fenómeno de suelo se construye el diagrama general de influencias.

El diagrama general de influencias de suelo se encuentra planteado con los ciclos de realimentación considerados principales, el modelo realizado con diagramas de flujos y niveles presenta una mayor cantidad de ciclos de realimentación no presentados en la

Figura 7, siendo el diagrama de influencias una vista general del fenómeno.

Tal como se nota en el diagrama de influencia en la

Figura 7, el sistema de suelo se comporta en el aspecto general de sus ciclos, como un sistema de control, perturbado por los ingresos de agua (Riego, lluvia o flujos sub-superficiales de entrada), pero a su vez controlado por las percolaciones, evaporación del suelo, transpiración de la planta, punto de saturación, entre otros. Debido a las necesidades técnicas del diagrama de influencias, se hace necesario suprimir una o varias letras de los elementos con nombres largos. A continuación,

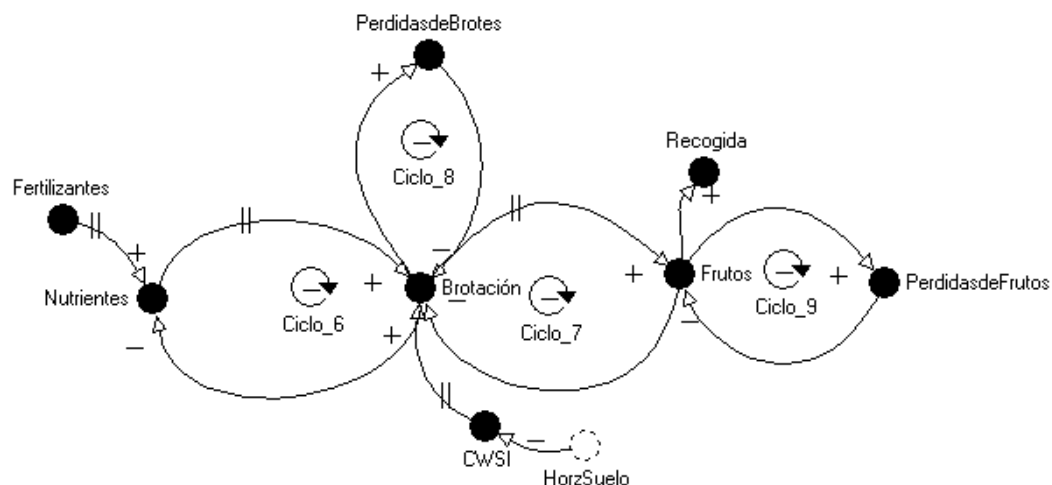
en la Tabla 1 se presenta los nombres extendidos con una breve explicación de su significado.

Los ciclos de realimentación correspondientes a la floración de cítricos son presentados en la Figura 8. No debe entenderse como un diagrama separado al presentado en la Figura 7, siendo ambas figuras la representación de los ciclos de realimentación existentes en el fenómeno, esta separación se realiza por presentación y facilidad de lectura.

Los diagramas causales se encuentran interrelacionados por el recurso hídrico y su dinámica en el horizonte de suelo, generando una relación inversa entre la cantidad de agua en el suelo y el índice de estrés hídrico (CWSI *por sus siglas en inglés*) que se encuentra directamente relacionado con la brotación.

En cuanto a los nutrientes, estos disminuyen respecto al número de brotes producidos, efecto similar se presenta entre los brotes y los frutos, así como con las pérdidas de brotes y frutos, siendo todos ellos ciclos de control y explicados en la Tabla 2.

Figura 8. Ciclos de realimentación de la brotación y floración de cítricos.



Fuente: El autor

Tabla 1. Nombres diagrama de influencias.

Nombre suprimido	Nombre completo	Explicación básica
VolSat	Volumen disponible de Saturación	Volumen de agua que ocupa todos los espacios vacíos en el horizonte de suelo.
Agua	Agua	Recurso hídrico
PercSuperficial	Percolación superficial	Infiltración del recurso hídrico en el horizonte de suelo debido a la acción de la fuerza de gravedad.
RequerHidrico	Requerimiento hídrico	Requerimiento hídrico del cultivo.
HorzSuelo	Horizonte de suelo	Volumen de suelo en el cual se encuentra la zona radicular de la planta.
EvapTransp	Evapotranspiración	Transpiración de la planta y evaporación del recurso hídrico presente en el horizonte de suelo.
PercProfunda	Percolación profunda	Percolación del recurso hídrico hacia la zona profunda de suelo o roca madre
FlujoSubSuperfi	Flujo sub-superficial	Flujo de percolación del horizonte debido a la inclinación del terreno

Fuente: Autor trabajo de grado

8.1 CICLOS DE REALIMENTACIÓN.

El modelo general de influencias posee 7 ciclos de realimentación dos positivos y cuatro negativos, explicados en la Tabla 2.

Tabla 2. Ciclos de realimentación del diagrama de influencias

Ciclo de realimentación	Signo	Explicación
Ciclo 1	Negativo (-)	menor recurso hídrico infiltrado, existirá una menor cantidad de agua en el horizonte de suelo y por ende se requerirá infiltrar mayor cantidad de agua para alcanzar el punto de saturación. [61],[62],[69].
Ciclo 2	Negativo (-)	El aumento del recurso hídrico en el horizonte de suelo disminuye el volumen de agua necesario para cumplir el requerimiento hídrico, a su vez, un aumento en las necesidades del requerimiento hídrico requiere de una mayor percolación de agua aportando un mayor volumen al horizonte de suelo[61],[62],[69]
Ciclo 3	Negativo (-)	Aumentar la cantidad de agua en el horizonte aumenta la evapotranspiración debido a una mayor disponibilidad del recurso hídrico, por su parte la evapotranspiración disminuye la cantidad de recurso hídrico disponible en el horizonte [61],[62],[69].
Ciclo 4	Negativo (-)	A mayor percolación profunda menor cantidad de recurso hídrico hay en el horizonte de suelo, además el aumento de agua en el horizonte suelo aumenta la percolación, con cierto retardo, debido

		a la resistencia opuesta al flujo del líquido por la porosidad del suelo [61],[62],[69].
Ciclo 5	Negativo (-)	Comportamiento similar al presentado en el ciclo 4, con la diferencia que este se presenta por los laterales del horizonte de suelo debido a la inclinación del terreno [61],[62],[69].
Ciclo 6	Negativo (-)	Disminución de los nutrientes en el suelo como resultado de la producción de frutos[70],[71],[72],[73].
Ciclo 7	Negativo (-)	Relación de la evolución de los brotes en fruto, suscitada en parte por el estrés hídrico, el cual ha inducido la brotación[15].
Ciclo 8	Negativo (-)	Perdidas de los brotes, debido a múltiples causas, planteado como un valor adimensional porcentual en el modelo de flujos y niveles.
Ciclo 9	Negativo (-)	Perdidas de los Frutos, debido a múltiples causas, planteado como un valor a dimensional porcentual en el modelo de flujos y niveles.

Fuente: Autor trabajo de grado

9 MODELO DE DINÁMICA HÍDRICA-FLORACIÓN

El modelo de dinámica hídrica floración se presenta en la Figura 9 en la cual se representa con diagramas y flujos niveles, desarrollado desde la relación causal dada por el estrés hídrico y su influencia en la brotación aplicado a cítricos.

El estrés hídrico varía según la cantidad de agua en la zona radicular cuya absorción varía de forma no lineal, no se absorbe agua en igual proporción durante todas las etapas. El agua cuando se encuentra sobre el umbral de agua fácilmente disponible (AFA) reduce el estrés hídrico y este factor facilita la producción al contar con las condiciones en las que se aseguran la vida y la planta puede encargarse de manera óptima de otras funciones fisiológicas, por el contrario cuando la baja cantidad de agua aumenta el estrés hídrico de la planta y como método de supervivencia la planta inicia un control estomático como medio de conservación de recursos y causalmente de la vida reduciendo sus funciones e impiden la formación de frutos, por esta razón, el estrés hídrico está ligado a la producción. Es difícil que la planta tienda a la producción cuando lucha por la conservación de su vida, por este motivo fue necesario partir de la dinámica hídrica antes de llegar al modelado de las etapas de floración de cítricos.

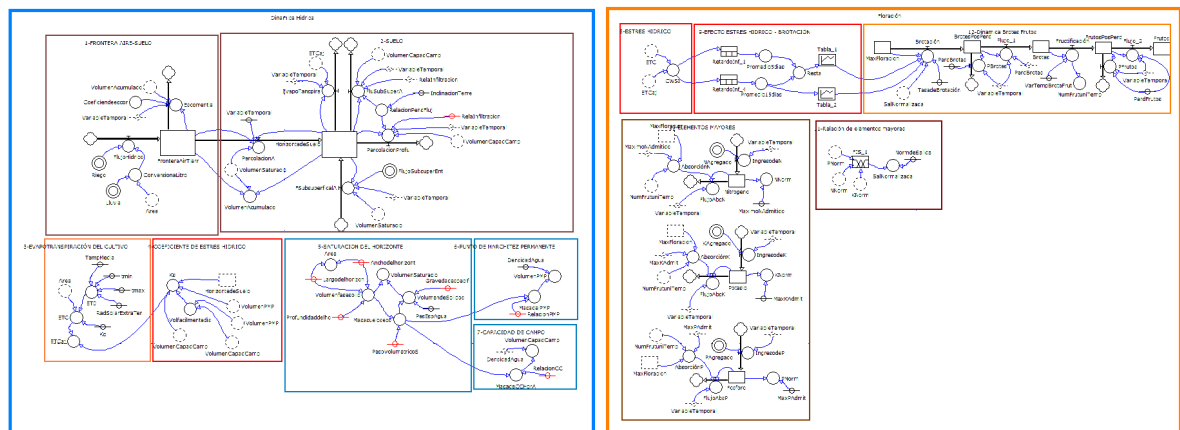
En la etapa de floración se presentan múltiples ecuaciones diferenciales como representación de los retardos, en las etapas de restablecimiento hídrico, además de no linealidades de una entrada y múltiples entradas construidas con Lógica Difusa. El modelo se presenta en el Anexo B en forma ampliada.

La dinámica hídrica representada en el sector azul, modela el comportamiento hídrico en el perfil de suelo explicado en el capítulo 6, con sus respectivas entradas y salidas de los distintos flujos hídricos (*percolación profunda, flujos subsuperficiales de entrada y salida, evapotranspiración e ingreso de recursos hídricos*), la escorrentía se representan mediante una frontera de aire suelo, permitiendo el ingreso del recurso hídrico al perfil de suelo (*zona radicular*) en los casos que el perfil de suelo no se encuentre saturado, la saturación del terreno, la capacidad de

campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP), son calculados según el tipo de suelo, así como el volumen del horizonte de suelo analizado, en cuanto a la evapotranspiración, esta se calcula en base a la ecuación de Hargreaves, la cual se basa en los datos de temperatura mínima y máxima, así como la radiación extraterrestre, estos datos a su vez son base del cálculo de el índice de estrés hídrico.

Por otra parte, la floración se relaciona con la dinámica hídrica mediante los cálculos evapotranspiración y el índice de estrés hídrico (CWSI), utilizados para representar la brotación y posterior floración junto a la causalidad no lineal con los nutrientes (*nitrógeno*, *fosforo* y *potasio*), el comportamiento no lineal de los nutrientes y su efecto en la brotación se realiza mediante un sistema de inferencia difuso (FIS_1), el cual se ha construido en múltiples reuniones con el experto en el área agrícola.

Figura 9. Modelo de dinámica hídrica-floración



Fuente: Autor trabajo de grado

El modelo de dinámica hídrica floración presentado en la Figura 9 se muestra con propósitos ilustrativos, debido que por el tamaño del modelo se dificulta su correcta visualización, por este motivo el modelo es explicado y evaluado de forma independiente, primero *Dinámica Hídrica* en los capítulos 9 y 10 y *floración* en el capítulo 11) para facilitar su comprensión.

9.1 PREMISAS DEL MODELO DE SUELO.

- El riego se realiza de manera uniforme en el terreno (De manera similar a la lluvia).
- Existe un solo horizonte de suelo.
- La evapotranspiración se realiza mientras el suelo contenga humedad en valores superiores al punto de marchitez permanente.
- El suelo siempre tiene una humedad mayor o igual al punto de marchitez permanente.
- El consumo hídrico no se encuentra relacionado con la fructificación.
- El nivel freático se encuentra a una profundidad mayor a 2 metros medidos desde la superficie del suelo.
- No se presenta nivel freático de baja profundidad, por ende, no se presenta ascenso capilar.
- Punto de máxima retención hídrica. Superado este punto se inicia el drenaje del agua desde un horizonte hacia el siguiente o hacia la roca madre, es decir, en los casos que se supera la capacidad de campo, el riego puede iniciar una percolación hacia horizontes más profundos en los cuales estén fuera del área radicular y existan pérdidas de la eficiencia del riego.
- Se considera un pH neutro en el suelo.
- Los nutrientes agregados al suelo como variables exógenas son absorbidos sin retardos
- No existe cohesión entre los nutrientes y el suelo por variabilidad del terreno.
- No se contemplan el daño radicular por mala aplicación de fertilizantes.

9.2 JUSTIFICACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN.

Como es sabido, el campo de estudio del agro y la ingeniería civil han creado sus propios modelos matemáticos, en muchos casos empíricos, que permiten representar con cierto grado de fiabilidad el comportamiento de los fenómenos propios de área, tales como la evapotranspiración, las escorrentías, percolaciones,

entre otros. Es así como, el modelo de suelo presentado se basa en estos desarrollos en muchos de los casos para construir y validar el modelo de simulación. Sin embargo, se considera válido aclarar qué; pese a los desarrollos realizados con anterioridad en el campo, los campos de estudio mencionados no responden la pregunta de investigación de este proyecto, aunado a que, estas ecuaciones no están contempladas para una hipótesis dinámica ni sistémica, es así como se hace imperativo el desarrollo del modelo de Dinámica de Sistemas presentado, que permita usar el modelo para la gestión del cultivo y toma de decisiones.

También se modela la floración y su relación causal estrés hídrico- Nutrientes, haciendo uso de la sinergia entre Dinámica de Sistemas y Lógica Difusa, que permite simular el fenómeno de floración de cítricos para la región ecuatorial (*Sin Inducción de floración por heladas*).

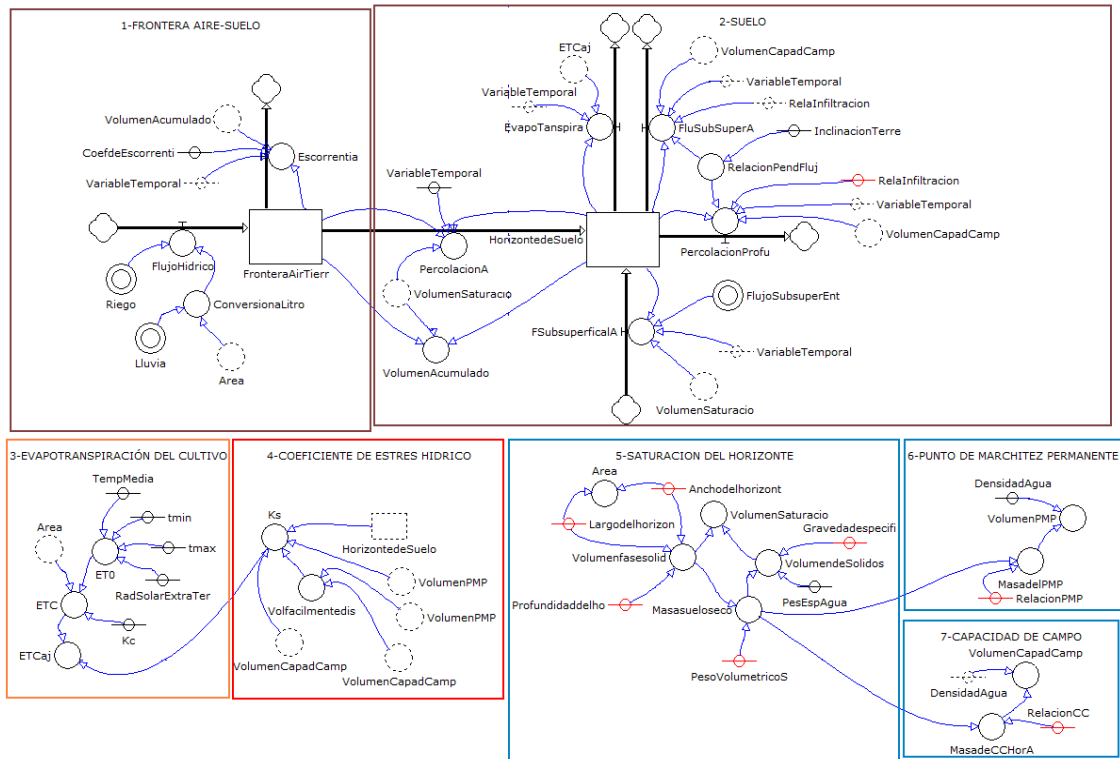
Durante la fase de búsqueda bibliográfica no se encontró ningún trabajo que realizara la sinergia de metodologías Dinámica de Sistemas y Lógica Difusa para el modelado y simulación de la floración en cítricos inducidos por el estrés hídrico.

10 MODELO DE SIMULACIÓN DE SUELO.

El modelo de suelo realizado en diagrama de Flujo-Nivel se presenta en la Figura 10 , en la parte superior y en color marrón se presenta la dinámica de la tierra, en la parte inferior izquierda en naranja la evaporación y transpiración de cultivo, en rojo, el coeficiente de estrés hídrico, el cual se comporta de forma no lineal, según la cantidad de recurso hídrico presente en el horizonte de suelo, en la parte inferior derecha y en azul, se encuentran el cálculo del punto de saturación, Punto de Marchitez Permanente (PMP) y la Capacidad de Campo (CC). La justificación de los sectores basado en la literatura se encuentra en la Tabla 4.

En paréntesis se han agregado los nombres reducidos de variables, flujos, parámetros y niveles del modelo de simulación, además se encontrará la equivalencia del nombre completo de la variable y su relación con el nombre asignado en el modelo de simulación en el Anexo A.

Figura 10. Modelo de simulación de suelo



Fuente: Autor trabajo de grado

10.1 VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE PARÁMETROS.

Debido a el comportamiento del fenómeno de suelo, se plantean los valores máximos y mínimos de los parámetros, en el caso de los distintos tipos de suelo en estado natural[74], para seleccionar el valor a ingresar en el modelo, revise la tabla de valores estándar según el tipo de suelo a simular, los valores que se ingresen en el modelo deben estar en conformidad con los rangos de valores planteados en la Tabla 3.

El volumen de suelo a simular, dado por el Ancho, largo y profundidad del suelo, está establecido por el tamaño radicular de una planta de cítricos tal como se estableció en el objetivo del presente trabajo y no para todo un cultivo, basado en [70], “Los árboles de cítricos tienen un perfil radicular de poca profundidad que se

concentra bajo el perfil vegetal de la planta". La profundidad radicular se establece en 80 cm, según el estudio [75], en el cual se plantea que, aunque la profundidad de cultivos de cítricos puede alcanzar los 1.50 m la mayoría de estas raíces se encuentran a una profundidad de 0.80 m.

La relación del Punto de Marchitez Permanente y la relación de Capacidad de Campo, se plantean según lo establecido por [76], entiéndase que el punto de marchitez permanente no debe ser mayor a la capacidad de campo por ningún motivo. En cuanto a la gravedad específica los valores típicos de suelo se encuentran en los rangos adimensionales de 2.65 a 2.72 [77].

En lo que corresponde a las temperaturas, se debe tener presente que el modelo ha sido realizado pensando en la zona tropical, por este motivo, no acepta heladas, los daños por helada no se encuentran contemplados en el modelo y sus temperaturas se han planteado para valores superiores a 15°C, por su parte la temperatura máxima es de 38°C , basado en los datos aportados por [78], la temperatura máxima debe ser mayor que la mínima, debido a la raíz cuadrada existente para cálculos de la evapotranspiración, caso contrario se infringiría las leyes matemáticas , de igual forma la temperatura media, debe estar en concordancia con los límites de temperatura antes mencionados (15°C - 38°C).

La radiación solar varía según la zona donde se encuentre el cultivo y el mes del año, aunque el presente modelo se ha desarrollado pensando en la zona tropical, la radiación extraterrestre, deberá establecerse según la latitud del cultivo, una tabla con los valores de radiación extraterrestre según la latitud en unidades de mm/día es presentado en [59][79].

La inclinación tiene rangos de 0 ° el cual representa un suelo totalmente plano hasta 80° considerando esta como una inclinación suficiente para el modelo de suelo, un suelo superior a esta inclinación como 90° estaría fuera de la actividad agrícola normal y sería equivalente a una planta sembrada de forma totalmente vertical, por este motivo los ángulos superiores a 80° no son contemplados en el modelo.

Tabla 3. Rango de valores de parámetros

Parámetro	Rango de valores
Ancho del horizonte (Ancho del horizonte)	100-250 [cm]
Largo del horizonte (Largo del horizonte)	100-250 [cm]
Profundidad del horizonte (Profundidad del horizonte)	80 [cm]
Peso volumétrico seco (Peso Volumétrico S)	1.25-1.65 [T/m ³]
Relación de Punto de Marchitez Permanente (Relación PMP).	1-16 [%][adimensional]
Relación de Capacidad de Campo (Relación CC)	4-28 [%][adimensional]
Gravedad específica (Gravedad específica)	2.65-2.72 [Adimensional]
Temperatura mínima diaria (t _{min})	15°C-35°C
Temperatura máxima diaria (t _{max})	17°C-38°C
Temperatura media (TempMedia)	15°C-38°C
Radiación Solar Extraterrestre (RadSolarExtraTer)	8.0-18.5 mm/día
Constante de evapotranspiración de cultivo (Kc)	0.5 [Adimensional]
Densidad del agua (Densidad Agua)	1 [Kg/L]
Inclinación del terreno (Inclinación Terreno)	0° - 80°
Relación de infiltración (Relación Infiltración)	0.16-0.85
Peso específico del agua (Peso Específico Agua)	1 [Ton/m ³]

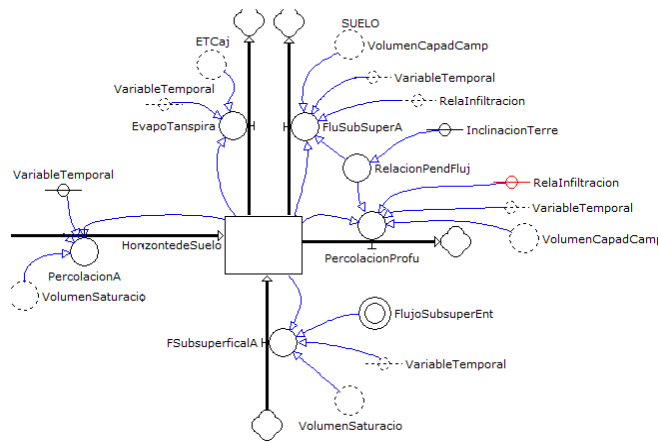
Fuente: Autor trabajo de grado

10.2 SUSTENTO EN LA LITERATURA.

Como método de evaluación de la estructura del modelo y siguiendo las recomendaciones de evaluación de [80], [81], se justifica la estructura del modelo basado en la literatura en la Tabla 4.

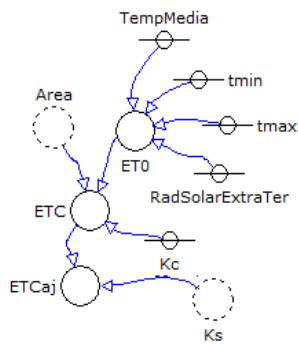
Tabla 4. Justificación de la estructura del modelo de simulación.

Sección del modelo	Justificación en la literatura
El diagrama de flujo ilustra la estructura del modelo de simulación. Las entradas principales son 'Riego' y 'Lluvia', representadas por círculos con doble contorno. 'Lluvia' se conecta a 'ConversioneLitro' (círculo simple). 'Riego' se conecta a 'FlujoHidrico' (círculo simple). 'Area' (círculo punteado) también se conecta a 'ConversioneLitro'. 'FlujoHidrico' y 'ConversioneLitro' convergen en un bloque rectangular central etiquetado como 'FronteraAirTierr'. Desde este bloque, una línea vertical ascendente lleva a 'Escorrentia' (círculo simple). 'Escorrentia' se conecta a 'VolumenAcumulado' (círculo punteado) y 'Coeficienteescor' (círculo simple). 'Coeficienteescor' también se conecta a 'Escorrentia'. 'VariableTemporal' (círculo punteado) se conecta a 'Escorrentia'. Una línea horizontal sale del bloque 'FronteraAirTierr' hacia la derecha.	Escorrentía: La frontera Aire Tierra, representa el espacio donde el riego o la lluvia se encuentra con el suelo, permitiendo de esta manera modelar el comportamiento de la escorrentía, en caso de suelo saturado el suelo no admitirá el recurso hídrico y este quedará en la superficie de la tierra, esta columna de agua en la superficie produce la escorrentía superficial [61], [62].



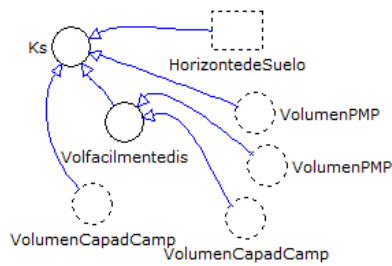
Suelo:

El suelo tiene varios flujos de entrada y salida[61], estos flujos son regulados en principal medida por la saturación, la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, es por la combinación de estos que se presenta el flujo de percolación profunda[62],[76]. Los flujos sub-superficiales de entrada y salida, están determinados por la inclinación del terreno y de los terrenos circundantes[69].



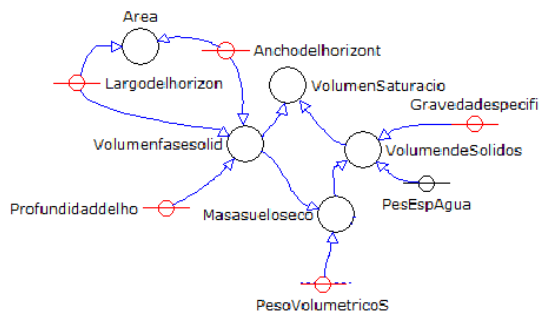
Evapotranspiración:

La Evapotranspiración del cultivo, dada por la evaporación debida a la radiación solar, y la transpiración de la planta se desarrolla según la ecuación empírica de Hargreaves[59][79].



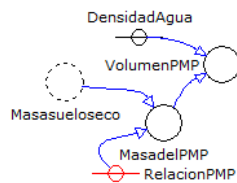
Coeficiente de estrés hídrico:

El estrés hídrico sufre modificaciones según la cantidad de agua fácilmente disponible, esta variación se plantea según las recomendaciones de cálculo de la FAO [69].



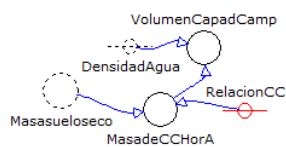
Saturación:

La saturación del terreno la cual determina la cantidad máxima de absorción del suelo, se establece según la propiedades volumétricas y gravimétricas del suelo [82].



Punto de marchitez permanente (PMP):

El punto de marchitez permanente, punto en el cual el agua es poco disponible para las plantas se determina según lo propuesto por [76]



Capacidad de campo (CC):

La capacidad de campo, valor en el cual se presenta la mayor cantidad de retención de líquido y punto en el cual al ser superado se inicia la percolación profunda se

determina según lo propuesto por [76].

Fuente: Autor trabajo de grado

10.3 RUDIMENTOS DEL PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN DE PARÁMETROS POR CONDICIONES EXTREMAS.

La evaluación de parámetros se realiza en base a los valores presentados en la sección *Valores mínimos y máximos de parámetros*; para realizar el procedimiento se mantienen los valores de los parámetros no analizados, y se realiza la modificación del parámetro analizado, desde su valor mínimo hasta el máximo, el resultado de mencionada modificación, es analizado en el comportamiento del nivel *Horizonte de suelo*, el cual representa el comportamiento hídrico, del riego y la lluvia en el suelo, y se evaluara que exista coherencia entre las variaciones y el valor . Durante el proceso de evaluación de extremos de parámetros, los parámetros no evaluados se mantendrán en un valor fijo, este valor se expresa en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores fijos de evaluación de parámetros

Parámetro	Valor
Ancho del horizonte (Ancho del horizonte)	150 [cm]
Largo del horizonte (Largo del horizonte)	150 [cm]
Profundidad del horizonte (Profundidad del horizonte)	80 [cm]
Peso volumétrico seco (Peso Volumetrico S)	1.80 [T/m ³]

Relación de Punto de Marchitez Permanente (RelacionPMP)	4.5 [%][adimensional]
Relación de Capacidad de Campo (RelacionCC)	8.5 [%][adimensional]
Relación de infiltración (Relainfiltracion)	0.40 [Adimensional]
Gravedad específica (Gravedadespecifi)	2.7 [Adimensional]
Temperatura mínima diaria (tmin)	23.0[°C]
Temperatura máxima diaria (tmax)	31.6[°C]
Temperatura media (TempMedia)	26.8[°C]
Radiación Solar Extraterrestre (RadSolarExtraTer)	18.5[mm/día]
Constante de evapotranspiración de cultivo (Kc)	0.5[Adimensional]
Densidad del Agua (DensidadAgua)	1 [Kg/L]
Inclinación del terreno (InclinacionTerre)	0°
Peso específico del agua (PesEspAgua)	1[Ton/m ³]

Fuente: Autor trabajo de grado

10.4 VARIABLES EXÓGENAS.

Tabla 6 Valores de variables exógenas

Variable exógena	Valor
Riego (Riego)	Paso entero iniciando en 0 [L/día] en una unidad de tiempo, posteriormente, dos unidades de tiempo de 1000 [L/día] y finalizando con 0 [L/día].

Lluvia (Lluvia)	Paso entero con 5 unidades de tiempo en 8 [mm/día] y finaliza con 0 [mm/día]
Flujo sub-superficial de entrada (FSubsuperficialA)	0

Fuente: Autor trabajo de grado

10.5 EJEMPLO DEL PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN DE PARÁMETROS

A continuación, se presenta un ejemplo del proceso realizado para la evaluación de un parámetro, los demás parámetros son evaluados y consignados en la Tabla 7 de verificación con sus respectivas anotaciones.

Valor analizado: Ancho del horizonte

Valor Inicial: 100 [cm]

Valor final: 250 [cm]

Nivel visualizado: Horizonte de suelo

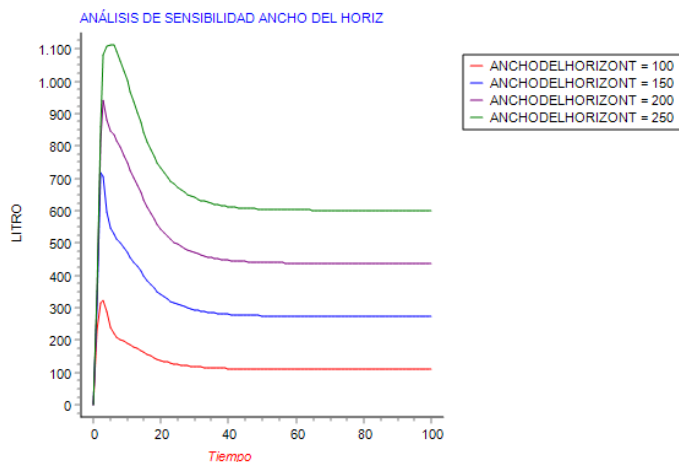
Tamaño de modificación del parámetro: 50 [cm]

Iteraciones: 3

El resultado de la modificación de la evaluación del parámetro se puede observar en Figura 11, donde se perciben los distintos comportamientos del modelo, al realizar cada una de las modificaciones del parámetro analizado.

El parámetro modificado puede observarse en la parte superior derecha de la figura, con su respectiva leyenda, para el caso particular, se realiza un análisis de sensibilidad para el parámetro Ancho del Horizonte.

Figura 11. Análisis de sensibilidad del parámetro Ancho del Horizonte



Fuente: Autor trabajo de grado

10.6 EVALUACIÓN DE PARÁMETROS.

Tabla 7 Resultado de la evaluación de parámetros mediante análisis de sensibilidad.

Parámetro	Inspección	Anotación
Ancho del horizonte (Anchodelhorizont)	✓	
Largo del horizonte (Largodelhorizon)	✓	
Profundidad del horizonte (Profundidaddelho)	✓	Constante, basado en el criterio que el modelo ha sido desarrollado para cítricos adultos con una profundidad radicular establecida.
Peso volumétrico seco (PesoVolumetricoS)	✓	Se modificó punto de inicio del valor de 1.51 a 1.50 permitiendo así que se logren 3 iteraciones con aumentos de 0.10 llegando al valor máximo de 1.80

Relación de Punto de Marchitez Permanente (RelacionPMP)	✓	La relación de capacidad de campo para este caso se estableció en 18% y así cumplir con el criterio que el punto de marchitez permanente (PMP) debe ser menor a la capacidad de campo.
Relación de Capacidad de Campo (RelacionCC)	✓	La relación del punto de marchitez permanente para este caso se estableció en 1% y así cumplir con el criterio que el punto de marchitez permanente debe ser menor a la capacidad de campo.
Gravedad específica (Gravedadespecifi)	✓	
Temperatura mínima diaria (tmin)	✓	La temperatura máxima se estableció en 38°C para cumplir con el criterio que la temperatura mínima debe ser menor que la temperatura máxima
Temperatura máxima diaria (tmax)	✓	La temperatura mínima se estableció en 15°C para cumplir con el criterio que la temperatura mínima debe ser menor que la temperatura máxima
Temperatura media (TempMedia)	✓	Temperatura mínima y máxima planteada en sus respectivos extremos, 15°C y 38°C respectivamente
Radiación Solar Extraterrestre (RadSolarExtraTer)	✓	
Constante de evapotranspiración de cultivo (Kc)	✓	

Densidad del Agua	✓
(DensidadAgua)	
Inclinación del terreno	✓
(InclinacionTerre)	

Fuente: Autor trabajo de grado

10.7 EVALUACIÓN DE UNIDADES.

Se realizó un recorrido por la parte superior del modelo (Dinámica Hídrica) y se comprobó que las unidades de las variables y flujos fueran correctas y coincidieran con las indicadas en las propiedades del modelo y su estructura, de esta manera se completó la lista de chequeo presentada en la Tabla 8.

Tabla 8. Comprobación de unidades modelo de suelo

Variables	Inspección
Coeficiente de escorrentía	✓
(Coeficientedeescor)	
Conversión a litros (Conversionalitro)	✓
Relación pendiente flujo	✓
(InclinaciónTerre)	
Evapotranspiración de referencia (ETO)	✓
Evapotranspiración de cultivo (ETC)	✓
Evapotranspiración bajo condiciones de estrés (ETCaj)	✓
Área (Area)	✓
Volumen de la fase solida	✓
(Volumenfasesolid)	
Volumen de saturación	✓
(VolumenSaturacio)	

Volumen de solidos* (VolumendeSolidos)	✓
Masa de suelo seco (Masasueloseco)	✓
Coeficiente de estrés hídrico (Ks)	✓
Volumen fácilmente disponible (Volfasilmentedis)	✓
Volumen del punto de marchitez permanente (VolumenPMP)	✓
Masa del punto de marchitez permanente (MasadelPMP)	✓
Volumen de la capacidad de campo (VolumenCC)	✓
Masa de la capacidad de campo (MasaCC)	✓
Flujos	Inspección
Flujo hídrico (FlujoHidrico)	✓
Percolación (PercolacionA)	✓
Evapotranspiración (Evapotranspira)	✓
Flujo sub-superficial de entrada (FSubsuperficialA)	✓
Flujo sub-superficial de salida (FluSubSuperA)	✓
Percolación profunda (PercolacionProfu)	✓

Fuente: Autor trabajo de grado

10.8 VALORES TEÓRICOS RECOMENDADOS.

Debido que se mantiene una relación entre los valores, según el tipo de suelo y aunque el modelo de simulación ha sido probado con valores extremos de sus

parámetros, se deben mantener cierta coherencia de los parámetros, que estén en concordancia según el tipo de suelo, por este motivo, se ha planteado una tabla de valores teórica, dado caso; no se cuente con valores reales de muestras de suelo y aun así se requiera realizar la simulación del comportamiento hídrico.

Los valores planteados se encuentran sustentados en la literatura como valores teóricos de los distintos tipos de suelo[76], [82], la gravedad específica se plantea en un punto medio de su escala como modo de simplificación, sin embargo, esta puede variar en el rango de valores estipulados para los parámetros.

Tabla 9. Referencia teórica aproximada de valores de suelo

	PMP[%]	CC [%]	Peso unitario seco. [Ton/m ³]	Relación de infiltración	Gravedad específica
Arena	4	9	1.65	0.85	2.7
Franco	12	20	1.40	0.51	2.7
Arcilla	17	28	1.25	0.16	2.7

Fuente: Valores basados en gráficos de Determinación del estado hídrico del suelo con la finalidad del riego- Universidad Politécnica de Valencia (UPV) [76] .

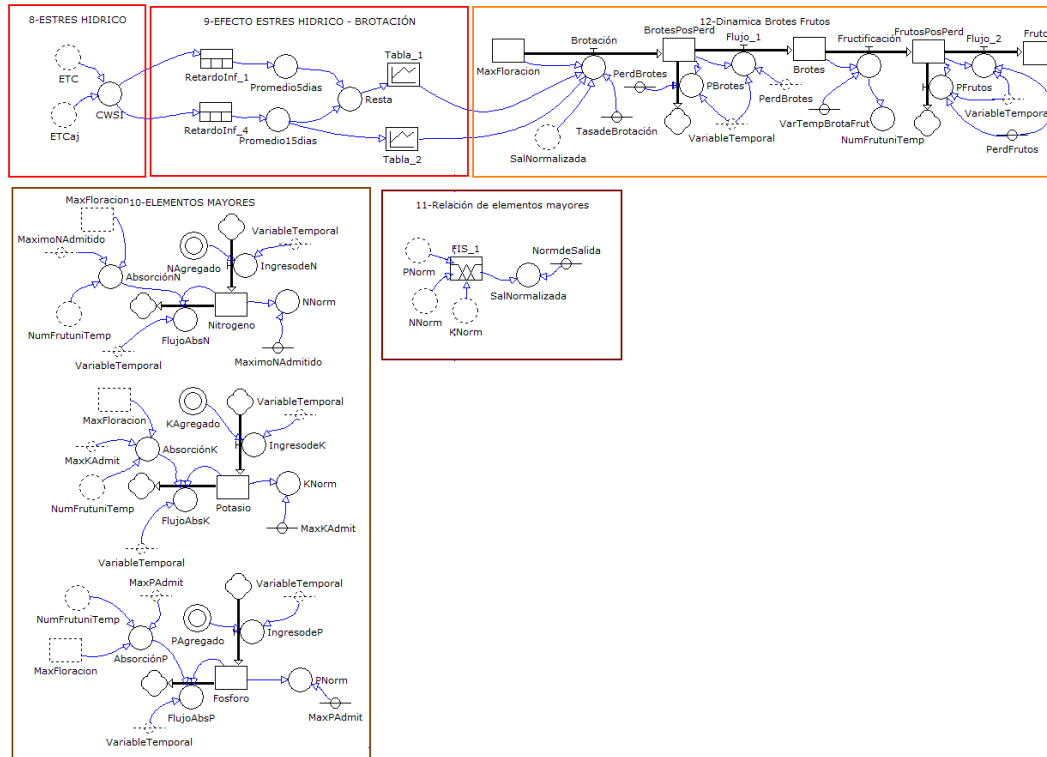
11 FLORACIÓN

11.1 MODELO DE FLORACIÓN

En el modelo la Dinámica hídrica y la Floración se encuentran sistémicamente ligados, a través de la variable de Índice de Estrés Hídrico o CWSI (*Crop Waters Stress Index*) siguiendo los datos de la literatura consultada, donde se ratifica que “Se corroboro que el estrés hídrico es el principal factor de inducción floral en condiciones tropicales para el cultivo de naranja ‘Valencia’[15], es así que se hace necesario modelar la interrelación del estrés hídrico para lograr representar su causalidad en la floración de cultivos de cítricos junto con los nutrientes, factor fundamental para la producción agrícola, relacionando su aporte a la cantidad de futuros frutos con un sistema de inferencia difuso.

La absorción de nutrientes de cítricos se construye con el apoyo del experto y datos de aplicación de fertilizantes y relacionados con un Sistema de Inferencia Difuso (FIS_1), los datos de entrada al FIS_1 así como la salida se encuentran normalizados, con el objetivo de generalizar el modelo a otro tipo de plantaciones tales como la *mangifera indica* que también relaciona el estrés hídrico con su producción [83], sin embargo deberá prestarse especial atención a los casos en que los requerimientos nutricionales sean distintos al de los cítricos. En los casos que sea el nitrógeno el fosforo y el potasio los que mayor aportación den a su producción podrán ser simulados sin realizar grandes modificaciones, sin embargo, este procedimiento, para *mangifera indica*, no se encuentra validado en el presente documento y debe evaluarse si existe una similitud en el comportamiento del nuevo fenómeno con la estructura planteada en este modelo evaluado para cítricos.

Figura 12. Diagrama de Flujos y Niveles con Sistema de Inferencia Difusa para modelado de la floración en cítricos.



Fuente: Autor trabajo de grado

11.2 VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS

La *Tasa de brotación* se calcula planteando un escenario hipotético de máximo rendimiento de 1200 brotes en condiciones ideales basado en una conversión de kg/árbol a frutos [71](Capacidad máxima productiva ideal), debido a esta condición deberían producirse 3.25 brotes diarios en un año, cuando los elementos fertilizantes se encuentran en su máxima capacidad, otorgando una relación difusa aproximada de 0.85 lo que de acuerdo con estas condiciones permite calcular la tasa de brotación de la siguiente manera:

$$0.85 * (1200 \text{ brotes}) * (\text{Tasadebrotación}) = 3.25 \left(\frac{\text{brotes}}{\text{dia}} \right)$$

$$\text{Tasadebrotación} \approx 0.0032 \left(\frac{1}{\text{dia}} \right)$$

Un escenario de condiciones menos favorables será regulado por la relación de variables de elementos mayores por el Sistema de Inferencia Difuso (FIS_1).

La *Variable temporal Brotes Fruto* debe ajustarse según el tiempo que los brotes tardan en convertirse en fruto.

El Máximo nitrógeno[71], fosforo[72] y potasio[73] admitido son planteados según la literatura para los cultivos de cítricos.

La normalización de la salida se planteó como una variable que permita aplicar el modelo a cultivos que tengan un comportamiento similar a los cítricos sin realizar cambios significativos en el Sistema de Inferencia Difusa (FIS_1), para el caso del modelo de cítricos se plantea un valor de 100. El valor debe modificarse en caso de cambios en el universo de discurso de la variable de salida del sistema de inferencia difuso.

Los procedimientos de evaluación del modelo de floración se han realizado teniendo en cuenta los rudimentos del proceso de evaluación explicados en el capítulo 10.

Tabla 10. Valores Máximos y mínimos de los parámetros de floración.

Parámetro				Valor
Tasa de brotación (TasadeBrotación)				0.0032 [1/día]
Variable temporal	Brotes	Fruto	1-365 [días]	
(VarTempBrotFrut)				
Máximo	nitrógeno	admitido	0.1-1000[g]	
(MaximoNAdmitido)				
Máximo	fosforo	admitido	0.1-190[g]	
(MaximoKAdmit)				
Máximo	potasio	admitido	0.1-400[g]	
(MaximoPAdmit)				
Normalización	de	la	salida	100
(SalNormalizada)				

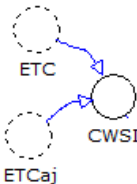
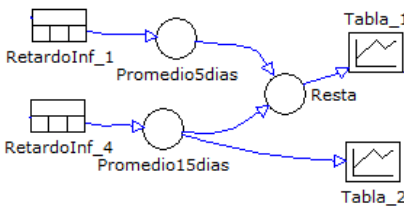
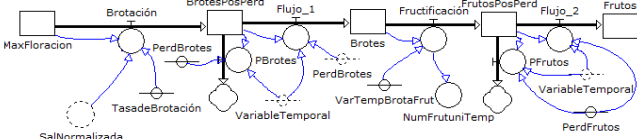
Perdida de brotes (PerdBrotes)	0-1 [Adimensional]
Perdida de fruto (PerdFrutos)	0-1 [Adimensional]

Fuente: Autor trabajo de grado

11.3 SUSTENTO EN LA LITERATURA

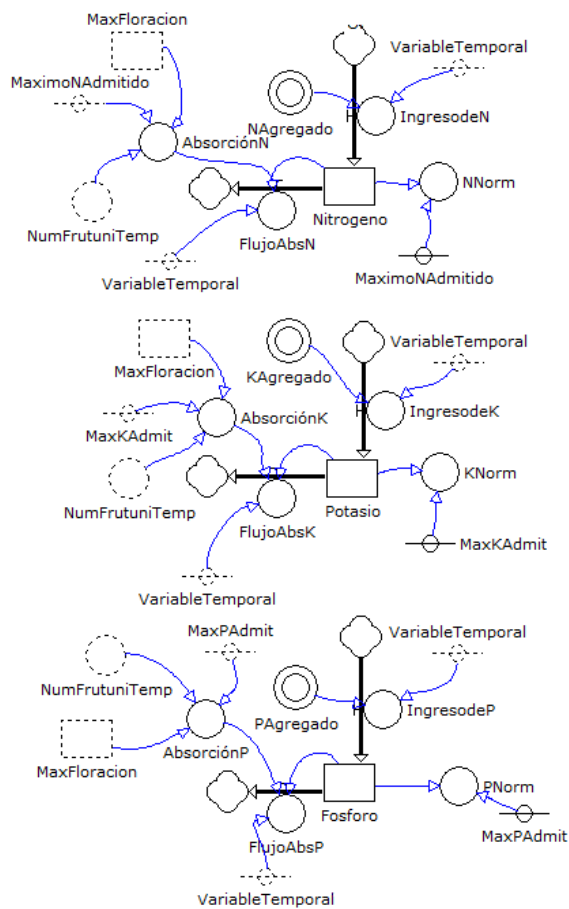
Los elementos desarrollados en el modelo de simulación poseen un sustento en la literatura, en esta sección, se plantea el sustento bibliográfico, así como una breve explicación del comportamiento de la sección de modelo en la Tabla 11.

Tabla 11. Sustento en la literatura de floración para la construcción del modelo.

Sección del modelo	Justificación
	Estrés Hídrico: El Índice de Estrés Hídrico (CWSI) se construye en base a la relación de evapotranspiración actual y evapotranspiración de referencia [84],[85].
	Efecto del estrés hídrico- Brotación: El modelamiento del efecto del estrés hídrico sobre la producción de brotes en cítricos se realiza mediante retardos del coeficiente de estrés hídrico, buscando representar las observaciones de [86].
	Dinámica brotes fruto: Teniendo en cuenta los datos aportados por [87], se plantean la

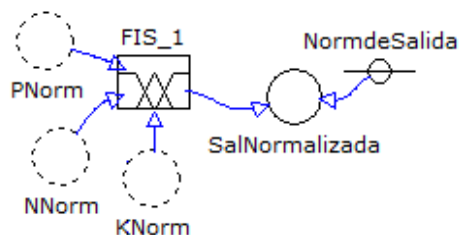
etapa de floración (brotes) y frutos como niveles según sea el desarrollo de la fase de fructificación.

Las abscisiones de brotes y frutos son modeladas como flujos de salida desde los niveles de Brotes y Frutos.



Elementos mayores:

Aunque existen gran variedad de elementos químicos que aportan en los distintos procesos fisiológicos[88], se modelan de los elementos mayores el Nitrógeno[71], el potasio[73] y el fosforo[72], como coadyuvante de la floración, los elementos son seleccionados con ayuda del experto en el área agrícola y relacionados con el sistema de inferencia difusa.



Relación de elementos mayores:

Los elementos mayores modelados se relacionan con un Sistema de Inferencia Difuso, el cual por su naturaleza

	matemática permite la interrelación de múltiples entradas, las cuales en este caso se encuentran relacionadas con las funciones de inferencia de una salida. La Interrelación de las diferentes variables del sistema de inferencia difusa se realizó con la ayuda del experto en el área agrícola. Esto permite agrupar los conocimientos del experto de la relación de elementos mayores que a su consideración aportan en mayor medida en el fenómeno, en el modelo de simulación en forma de no linealidad de múltiple entrada.
--	---

Fuente: Autor trabajo de grado

11.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad es realizado modificando el parámetro en inspección y manteniendo los otros valores sin modificación. Los valores de estos parámetros y niveles están establecidos como:

Tabla 12. Valores en el modelo al momento de realizar el análisis de sensibilidad

Parámetro	Valor
Perdidas de Brotes (PerdBrotes)	0[adimensional]

Variable Temporal Brotes a Fruto	210[días]
(VarTempBrotFrutos)	
Perdida de frutos (PerdFrutos)	0[adimensional]
Máximo Nitrógeno Admitido	1000[g]
(MaximoNAdmitido)	
Máximo Potasio Admitido (MaxKAdmit)	600[g]
Máximo Fosforo Admitido (MaxPAdmit)	65[g]
Niveles	
Máxima Floración (MaxFloracion)	1000
Nitrógeno (Nitrogeno)	1000[g]
Potasio (Potasio)	600[g]
Fosforo (Fosforo)	65[g]

Fuente: El autor

Tabla 13. Inspección del análisis de sensibilidad de la zona de floración del modelo de simulación.

Parámetros	Inspección	Anotación
Perdidas de Brotes (PerdBotes)	✓	
Variable Temporal Brotes a Frutos (VarTempBrotFrut)	✓	
Perdidas de frutos (PerdFrutos)	✓	
Máximo Nitrógeno admitido (MaximoNAdmit).	✓	Se realiza la modificación del nivel Nitrógeno para seguir cumpliendo con la normalización.

Máximo Potasio Admitido (MaxKAdmit).	✓	Se realiza la modificación del nivel Potasio para seguir cumpliendo con la normalización.
Máximo Fosforo Admitido (MaxPAdmit).	✓	Se realiza la modificación del nivel Fosforo para seguir cumpliendo con la normalización.

Fuente: Autor trabajo de grado

11.5 EVALUACIÓN DE UNIDADES

Se realizó una inspección de la parte inferior del modelo Floración y se comprobaron las unidades de los Niveles Flujos y parámetros.

Tabla 14. Inspección de unidades de la zona de floración del modelo de simulación.

Variables	Inspección
Índice de estrés hídrico (CWSI)	✓
Promedio 5 días (Promedio5dias)	✓
Promedio 15 días (Promedio15dias)	✓
Resta	✓
Números de frutos diarios (NumFrutDia)	✓
Absorción de Nitrógeno (AbsorcionN)	✓
Absorción de potasio (AbsorciónK)	✓
Absorción de fosforo (AbsorciónP)	✓
Nitrógeno normalizado (NNorm)	✓
Potasio Normalizado (KNorm)	✓

Fosforo Normalizado (PNorm)	✓
Salida Normalizada (SalNormalizada)	✓
Flujo	Inspección
Brotación (Brotación)	✓
Fructificación (Fructificación)	✓
Flujo de Absorción de Nitrógeno (FlujoAbsN)	✓
Flujo de absorción de potasio (FlujoAbsK)	✓
Flujo de absorción de fosforo (FlujoAbsP)	✓

Fuente: El autor.

11.6 SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSO

El sistema de inferencia difuso ha sido desarrollado a través de múltiples entrevistas con el experto, en las cuales se han seleccionado los elementos mayores que más aportan en el proceso de floración en los cultivos de cítricos. Además, se han normalizado los valores de entrada y salida del sistema de inferencia difuso (FIS_1), con el fin de producir algún grado de generalización para otras especies frutales con comportamientos similares a los cítricos. Los valores de normalización se han planteado de acuerdo con [21], [22], [23], [28].

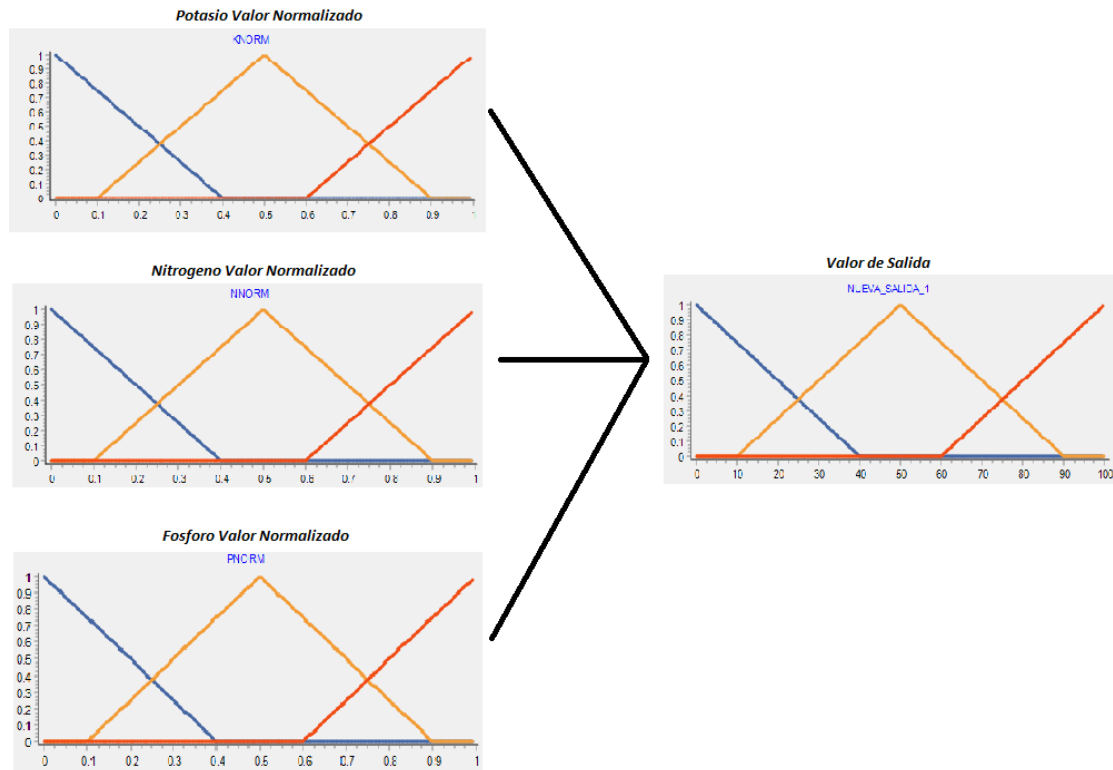
La integración de Sistemas de Inferencia Difusa (FIS) con Dinámica de Sistemas (DS), aportan al modelo de Dinámica de Sistemas la comprensión cualitativa del experto respecto al comportamiento del fenómeno, en términos de funciones No-Lineales, en este caso, una No-Linealidad de múltiples entradas y una salida (MISO).

El sistema de inferencia difuso se ha considerado apropiado para la integración con Dinámica de Sistemas, por el comportamiento en rangos de la aplicación de

nutrientes, los cuales son expresados en muchos casos de forma semántica tanto en la literatura como por los expertos en el área, debido al comportamiento propio del fenómeno, es así, que se considera el sistema de inferencia difuso como metodología integradora, por la similitud con el comportamiento observado y su cercanía con el razonamiento humano.

La función entradas-salida, Figura 14, se obtiene por la interacción de las relaciones SI-ENTONCES de las variables lingüísticas presentada en la Figura 13. Las reglas lingüísticas son construidas mediante funciones de membresía triangulares como método de simplificación, distribuidos en tres funciones de membresía (alto, normal y bajo) para cada entrada (nitrógeno, fosforo, potasio) y se encuentran relacionadas con la función de salida (Vea la Figura 13), la cual, variará según la relación de las entradas. La variable de salida presenta una distribución similar con distinto universo de discurso, considerándose suficientes el número y tipo de funciones para representar el fenómeno.

Figura 13. Variables de entrada Sistema de Inferencia Difuso (FIS_1)



Fuente: Autor trabajo de grado

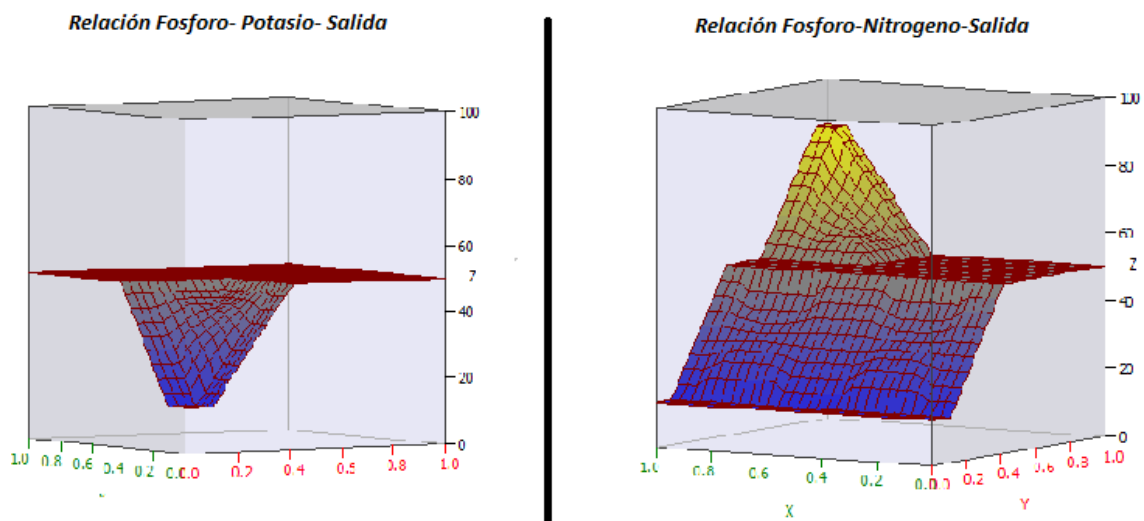
En particular, la Figura 14 muestra la relación de fosforo y potasio como variable de entrada relacionado con la variable de salida(izquierda) y la relación entre nitrógeno y fosforo y la salida del sistema de inferencia difuso (derecha). Donde se evidencia la causalidad que existe entre el nitrógeno, el fosforo y potasio y su relación con la floración de cítricos, siendo esta el resultado de las relaciones de las funciones de membresía utilizando el método de inferencia difuso de Mamdani.

Al operar las funciones de membresía del sistema de inferencia difuso, Figura 13, utilizando el sistema de inferencia de Mamdani, se obtiene la representación en la Figura 14.

Los valores de entrada del sistema de inferencia difuso (FIS) han sido normalizados, buscando la generalización, para abordar los distintos tipos de cítricos y de cultivos, con diferentes valores nutricionales, diferentes a los planteados inicialmente en el modelo de simulación; para evitar la modificación de los universos de discurso, así

como de las funciones de membresía y su interrelación, sin embargo, si los elementos mayores cambian, o la forma como estos elementos se relacionan con la salida, deberá construirse un nuevo sistema de inferencia difuso.

Figura 14 Izquierda: Gráfico 3D Relación Difusa, Eje x: Fosforo, Eje y: Potasio, Eje z: Salida. Derecha: Grafica 3D Relación Difusa. Eje x: Fosforo, Eje y: Nitrógeno, Eje z: Salida



Fuente: Autor trabajo de grado

Las relaciones de dos de las entradas con la salida son presentadas al lado izquierdo y al lado derecho de la Figura 14, teniendo presente que el representar dos entradas con respecto a una salida produce un gráfico tridimensional o en R^3 . La representación de todas las variables de entrada y salida requiere una representación en R^4 .

12 APLICACIONES EN ENTORNOS REALES

12.1 GESTIÓN Y USO EFICIENTE DE RIEGO

Debido a la manera como se ha modelado el fenómeno de floración de cítricos, se ha dedicado buena parte al modelo de dinámica hídrica, el cual puede utilizarse como método de simulación para la gestión de riego de cultivos.

Para realizar el procedimiento de simulación primero se deberán ajustar los parámetros de radiación solar, según la zona en la que se encuentre el cultivo, índice de evapotranspiración, tipo de cultivo y tamaño del perfil de suelo. Los parámetros se indican en color rojo y su ajuste es necesario para lograr una correcta simulación. El estrés hídrico podrá observarse en la variable *CWSI* y la dinámica hídrica en el nivel llamado *Horizonte*. Un análisis de escenarios permite analizar una Dinámica Hídrica Aproximada en el perfil de suelo, después de haber ajustado los parámetros y las variables exógenas de *Riego* y *Lluvia*. Para los valores de lluvia pueden usarse las predicciones meteorológicas que permitan realizar un plan de Riego para el cultivo el cual podrá modificarse según el grado de acierto de las predicciones.

12.2 GESTIÓN PRODUCTIVA POR RIEGO MANUAL

Las relaciones sistémicas planteadas en el modelo de simulación entre el estrés hídrico y algunos de los elementos mayores permiten gestionar la fecha de producción agrícola con cierta aproximación mediante riego manual. Para realizar este proceso deberán seguirse los siguientes pasos:

- Ajustar los parámetros de la zona de modelo correspondiente a dinámica hídrica.

- Ajustar las variables exógenas de lluvias según las predicciones meteorológicas.
- Ajustar la cantidad de nutrientes en el sector de Elementos Mayores
- Realizar los análisis por escenarios con modificaciones de la variable exógena Riego.
- Mediante riego manual proceder al riego de la planta basado en los valores de la variable riego que mejor se ajusta a las necesidades del productor según los escenarios calculados.

Se recomienda que además de la gráfica productiva generada se analicen en los escenarios la dinámica hídrica, buscando la gestión eficiente de recursos hídricos, que impidan pérdidas de recursos hídricos por escorrentía o percolación profunda.

12.3 RIEGO AUTOMÁTICO (CONTROLADOR ON/OFF BASADO EN MODELO EXTERNO)

Basado en el modelo de simulación se plantea un sistema automático de riego, el cual debe regular la cantidad de agua aplicada a la planta según sea las necesidades productivas, la propuesta de sistema de control se presenta en la Figura 15, encargándose de regular un riego deficitario que induzca estrés hídrico sin superar los puntos de marchitez permanente, posterior a la inducción del estrés hídrico, se procederá al riego en el grupo de valores correspondientes al agua fácilmente disponible apartando a la planta del estrés hídrico previamente inducido que a su vez permitirá inducir la floración (para comprender las zonas de operación planteadas, consulte los capítulos 6 y 7).

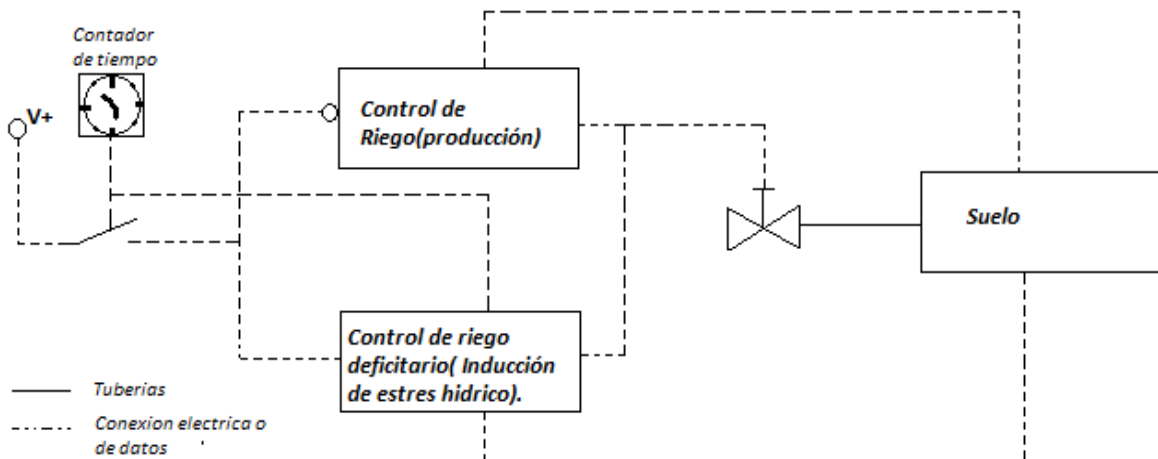
Visto de forma general se tienen dos sistemas de control, uno regulador del riego y otro inductor de estrés hídrico, sin embargo, se busca que ambos tengan la suficiente sencillez para estar incluidos en un mismo dispositivo controlador, para lograr este objetivo se propone aprovechar los cálculos realizados por métodos numéricos del modelo matemático obtenido del modelo de simulación, para

alimentar el controlador, con el fin de evitar cálculos redundantes que representen un gasto innecesario de la capacidad del dispositivo de control.

Debido que el controlador de riego e inductor de estrés hídrico no deben funcionar a la par se utiliza un reloj el cual puede crearse en un dispositivo microcontrolador con interrupciones u otros métodos, para que haga las veces de control de encendido sabiendo que, se necesita un tiempo prudencial para llegar a producir estrés hídrico en la planta, pasado este tiempo se procederá al apagado de uno de los controladores (Riego deficitario) y al encendido del otro (Riego productivo).

Con el fin de mantener el sistema económico, confiable y reparable, se propone una válvula de control ON/OFF.

Figura 15. Diagrama general de sistema de control automático ON/OFF



Fuente: Autor trabajo de grado

Seudocódigo del controlador ilustrado en la Figura 15.

Con propósito de la implementación del controlador anterior, es útil, la representación de este en términos de pseudocódigo, el cual es pertinente para facilitar esta implementación.

Constantes {

Límite inferior Agua Fácilmente Disponible (LI_AFA)

```

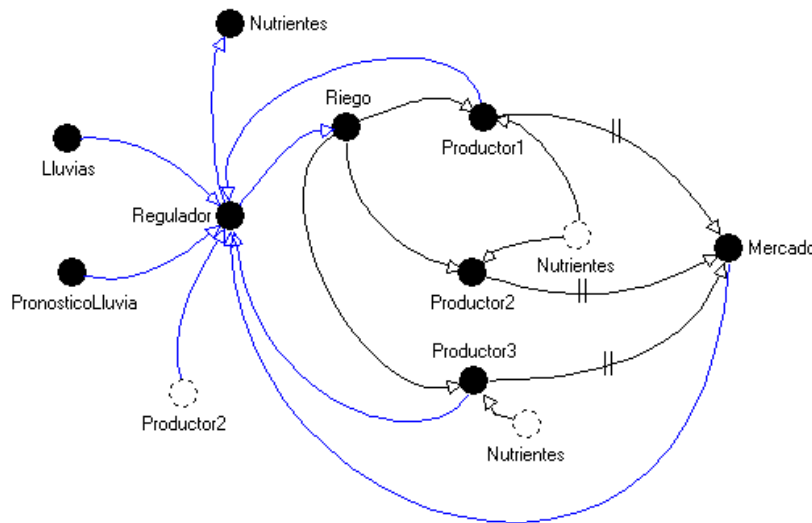
    Limite Superior Agua Fácilmente Disponible (LS_AFA)
    Punto de Marchitez Permanente (PMP)
    Reloj (CLK)
}
Variables {
    Humedad del Suelo= Entrada
    Pin de Activación de válvula (PAV) =Salida
}
##ciclo de estrés hídrico
Si (Humedad del Suelo=(PMP+20%*PMP) && CLK<15(días)) {
    PAV=Encendido
}
Si (Humedad del Suelo= (LI_AFA-20%*LI_AFA) && CLK<15(días)) {
    PAV=Apagado
}

## Ciclo de riego normal
Si (Humedad del Suelo=LI_AFA && CLK>15(días)) {
    PAV=Apagado
}
Si (Humedad del Suelo=LS_AFA && CLK>15(días)) {
    PAV=Apagado
}

```

12.4 REGULACIÓN BÁSICA DE LA PRODUCCIÓN ASOCIADA PARA LA ATENCIÓN DE UN MERCADO

Figura 16. Estructura causal básica para la producción agrícola asociada



Fuente: Autor trabajo de grado

La estructura causal básica para la producción agrícola asociada se desarrolla como un sistema de control (ver Figura 16), el elemento regulador debe gestionar la cantidad de riego y nutrientes que debe aplicar cada productor para cumplir con la cuota de mercado y evitar las pérdidas productivas, además el elemento regulador deberá tener en cuenta la forma como avanzan las cosechas de cada productor, las lluvias, pronósticos de lluvias y las necesidades de mercado para indicar las acciones que ahorren recursos hídricos y nutrientes para cumplir con las necesidades de del mercado. El ente regulador puede estar conformado por una asociación de productores y no necesariamente por un ente externo a la producción. A modo de presentación en Figura 16 se muestran tres productores, sin embargo, el número de productores pueden ser más mientras cumplan con las instrucciones dadas por el ente regulador de sistema. Entiéndase que el regulador solo otorga datos a los productores por esta razón en el diagrama se plantean (flujos de

información líneas azules) y los productores serán los encargados de aplicar estos requerimientos en sus cultivos (flujos de material líneas negras).

12.5 OTRAS APLICACIONES

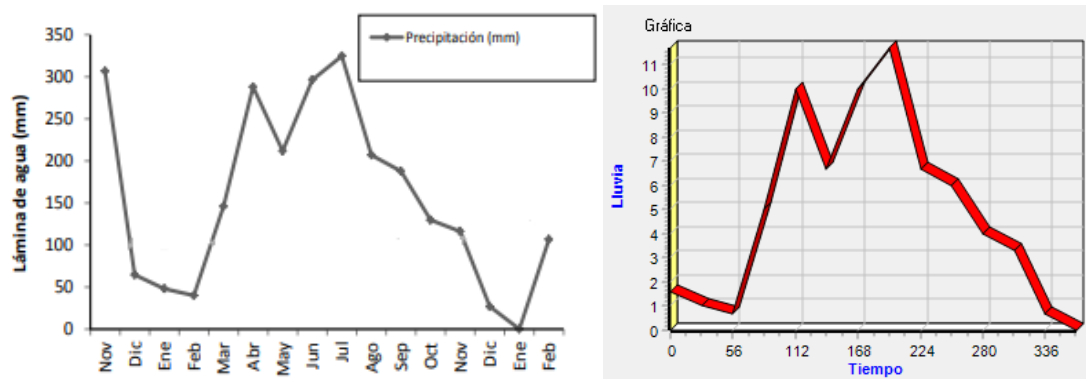
- Programación de riego.
- Análisis de lámina de riego.
- Análisis estados de suelo para escenarios de fenómenos naturales (fenómeno de la niña o niño).
- Determinar cultivos propicios para el tipo de suelo basados en sus requerimientos hídricos.

13 VALIDACIÓN SOBRE TRABAJOS PREVIOS.

Con el fin de hacer una validación del modelo con el comportamiento del fenómeno real, se comparan los datos presentados por [15], en los cuales se registra la pluviometría desde noviembre del año 2008 hasta principios del año 2010 así como la floración de árboles en naranja valencia en etapa productiva (*Citrus Sinapsis Osbeck*), en esta fecha.

Valiéndonos de los datos de lluvia de los meses finales del año 2008 (diciembre) y el año 2009 se realiza la simulación y se compara con las gráficas de floración de cítricos presentadas en el mismo trabajo [15]. Debido que el fenómeno posee retardos de aproximadamente un mes en la causalidad lluvia floración, se hace necesario utilizar los registros pluviométricos de diciembre del año 2008 para simular los primeros meses del 2009.

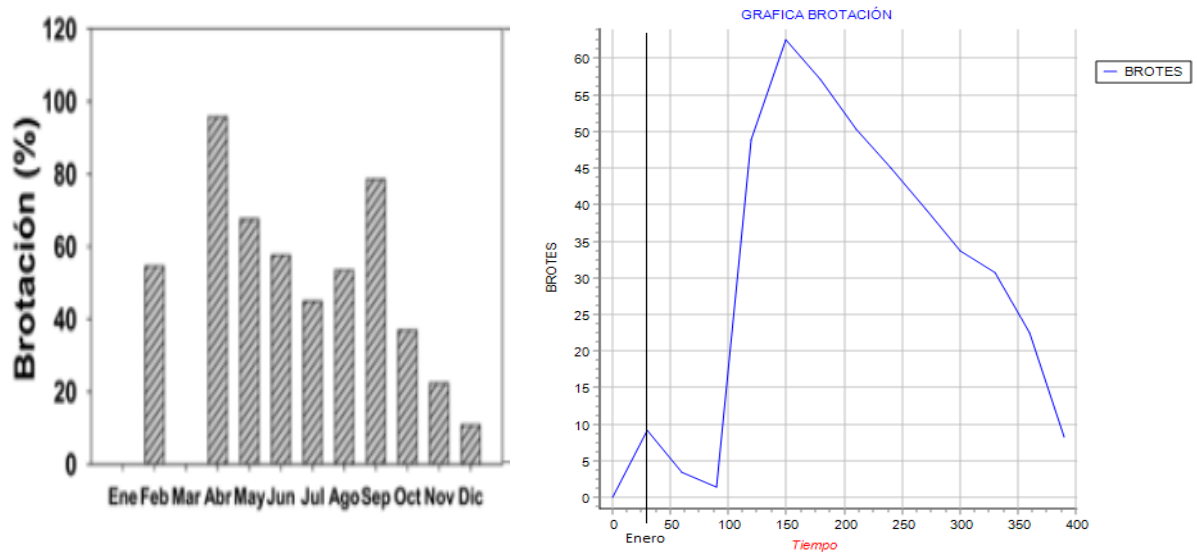
Figura 17. Comparativa de datos pluviométricos externos y datos ingresados al modelo de simulación.



Fuente: Modificación Ordúz - Rodríguez et al de Alternancia de la producción y comportamiento fenológico de la naranja y El autor.

teniendo presente que los valores del entorno real poseen un registro mensual y el modelo se ha planteado con un paso de simulación diario, los valores mensuales se han dividido en 30 días (se omite el valor de lluvias del mes de noviembre con el fin de modelar el comportamiento del año 2009).

Figura 18. Comparativa de porcentaje del fenómeno real con resultados de simulación (Izquierda: Valores observados, Derecha: Valores simulados).



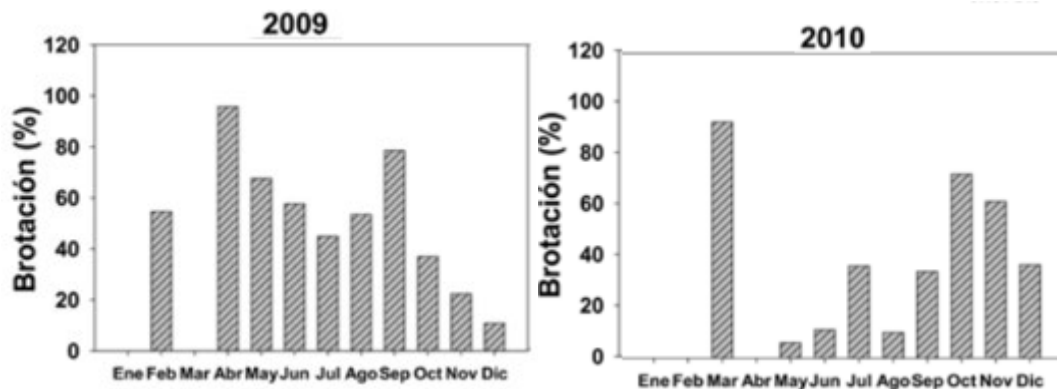
Fuente: Modificación Orduz - Rodríguez et al de Alternancia de la producción y comportamiento fenológico de la naranja y El autor.

El resultado de la simulación muestra una respuesta cualitativamente similar con las tendencias observadas en el fenómeno real, exceptuando el pico de brotes que se presenta en el mes de septiembre, posiblemente inducido por algún tipo de estrés ambiental no contemplado en el modelo de simulación. La amplitud de los picos podría no ser coincidente con los datos reales, debido que, no obstante, se cuenta con los datos pluviométricos, no se tiene referencias del tipo de suelo ni de los

nutrientes, por este motivo estos valores se ingresaron de forma teórica en el modelo de simulación.

Desde una perspectiva numérica se realizó el cálculo del error, en los años 2009 y 2010, respecto a los resultados de la simulación. Los resultados bienales de brotación presentados por Orduz en su trabajo [15] se ilustran en la Figura 19.

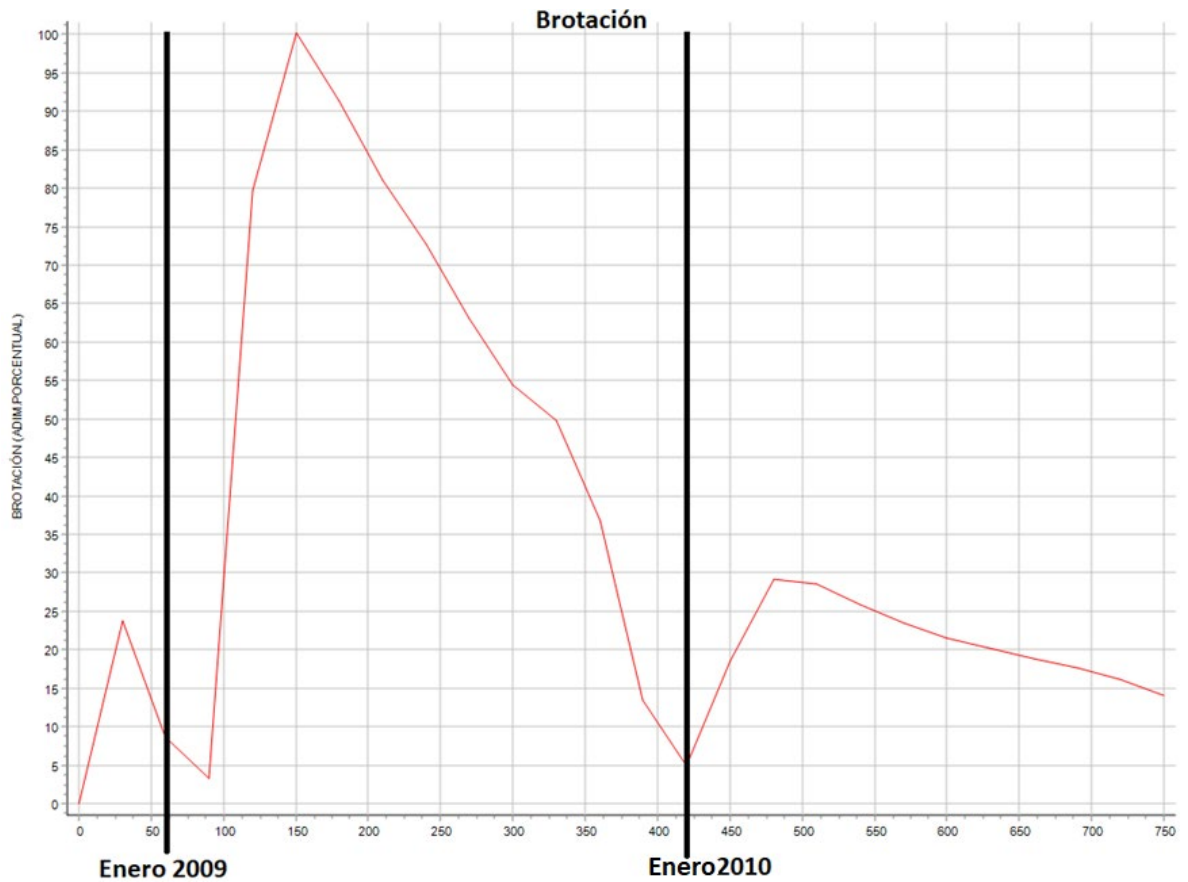
Figura 19 Resultados de bienales de brotación en naranja valencia.



Fuente: Alternancia de la producción y comportamiento fenológico de la naranja valencia, Orduz et al.

El resultado de la simulación con los datos pluviométricos otorgados por [15] son presentados en la Figura 20, mientras que el cálculo del error se presenta en la ecuación 1 (EC1) .

Figura 20. Resultados de simulación basados en datos pluviométricos reales para el año 2009- 2010



Fuente: Autor trabajo de grado

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

$$\begin{aligned}
 Error \approx & ((54 - 3) + (100 - 100) + (91 - 82) + (81 - 60) + (72 - 46) + (63 - 52) \\
 & + (80 - 55) + (50 - 40) + (37 - 22) + (14 - 12) + (100 - 29) + (26 \\
 & - 12) + (24 - 14) + (26 - 22) + (20 - 10) + (30 - 19) + (62 - 18) \\
 & + (60 - 16) + (40 - 14)) / 19
 \end{aligned}$$

$$Error \approx 22\%$$

Los resultados reales aportados por el documento [15] son comparados con los resultados de la simulación mes a mes y finalmente promediados con el total de

muestras, debido que no se tomaron 5 muestras durante el periodo de medición, el cálculo del error se promedia con 19 muestras y no con 24 que corresponde al número de meses totales (2 años), sin computar los resultados de simulación que correspondieran a los meses con muestras faltantes.

Aunque se espera cierto grado de aproximación de la respuesta del modelo con el fenómeno real, no se considera lograr una representación exacta, aunque suficiente para la toma de decisiones, debido que el fenómeno cuenta con muchas variables no integradas al modelo y por principio, son tantas que los modelos suelen ser una aproximación de la realidad, mas no la realidad misma. Teniendo en cuenta que, el ajuste del modelo de simulación es el resultado, de la búsqueda de la explicación lograda con el paradigma Dinámico-Sistémico y la aplicación de los 5 lenguajes, lo cual facilita la verificación de las cuatro condiciones para la validación de la explicación científica (Descripción de la experiencia, mecanismo generativo, deducción y realización) propuestas por Humberto Maturana et al en [89]

14 CONCLUSIONES

El modelo desarrollado en el presente trabajo constituye una evidencia del cumplimiento de los objetivos de esta investigación.

Esta propuesta de modelo de simulación agrícola aplicado a cítricos plantea 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.

Los avances planteados en esta investigación permiten conocer en mayor profundidad la interrelación sistémica entre las variables y una comprensión del fenómeno modelado desde la causalidad del estrés hídrico y la producción de cítricos.

A partir de los logros de este trabajo, cabe la posibilidad de escalar este modelo de simulación a un producto en fase final de despliegue (según las fases de madurez tecnológica), que permita replantear las estrategias productivas agrícolas, en busca de un uso efectivo de los recursos hídricos y del suelo.

Aunque el modelo planteado simula la tendencia de brotación del fenómeno real, se recomienda una etapa de ajuste y prueba del modelo de simulación durante su uso en entornos reales, entendiendo que el desarrollo de proyectos debe cumplir con 9 fases de madurez tecnológica y este proyecto cumple con las 3 primeras fases o "*Pruebas de concepto*". Previo a su aplicación generalizada, considerando que se deben realizar las verificaciones correspondientes y cumplir las fases de desarrollo pertinentes antes de ser catalogado como un producto en fase final o de despliegue. Se encontró según la literatura consultada que, en algunas especies de plantas, existe una relación causal entre el estrés hídrico y la producción (afirmación aplicada al modelo de simulación), lo que potencialmente induce una generalidad del modelo de simulación, para la regulación productiva de especies diferentes a los cítricos,

sin embargo, serán necesario realizar las pruebas correspondientes para comprobar esta hipótesis[90][83].

El modelo puede aplicarse (posterior a las respectivas pruebas de laboratorio), en gestión manual o automática de la lámina de riego o gestión productiva, posterior a los ajustes de los parámetros del suelo en el que se encuentre el cultivo.

En cuanto al software evolución desarrollado por el grupo de investigación SIMON en la Universidad Industrial de Santander (UIS) demostró ser pertinente para la integración de Dinámica de Sistemas y lógica difusa como estrategia integrativa para el desarrollo de modelos de simulación, especialmente porque el módulo de lógica difusa se encuentra incluido, permitiendo así interconectar el sistema de inferencia difuso a el modelo en dinámica de sistemas.

La comprensión del fenómeno, derivada del modelo de simulación representado con Dinámica de Sistemas y lógica difusa y que permite recrear fenómenos complejos a partir del conocimiento de los expertos y diversas fuentes; puede soportar el desarrollo de sistemas de control automático, de alta complejidad y utilidad, que además sean pertinentes en su diseño a las necesidades propias del lugar de aplicación.

Debido al potencial agrícola del país y dado que el sector agrícola es el de mayor consumo hídrico en la nación según el Estudio Nacional del Agua 2018 [91], se considera crucial la continuidad de este proyecto como método de protección de los recursos hídricos y garantizar la producción agrícola eficiente y la seguridad alimentaria.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MINAGRICULTURA, *Revisión de Políticas Agrícolas de la OCDE: Colombia 2015*. OECD, 2015.
- [2] “Biblioteca IDEAM Koha › Detalles de: Estudio Nacional del Agua 2018.” <http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=38335> (accessed Nov. 09, 2020).
- [3] N. Martínez Rojas and H. H. Andrade Sosa, “Integración de la Lógica Difusa a la Dinámica de Sistemas para la selección de terrenos de cultivos agrícolas,” *ELEMENTOS*, vol. 6, no. 6, p. 149, Oct. 2016, doi: 10.15765/e.v6i6.842.
- [4] V. Karavezyris, K. P. Timpe, and R. Marzi, “Application of system dynamics and fuzzy logic to forecasting of municipal solid waste,” *Math. Comput. Simul.*, vol. 60, no. 3–5, pp. 149–158, Sep. 2002, doi: 10.1016/S0378-4754(02)00010-1.
- [5] F. Nasirzadeh, A. Afshar, M. Khanzadi, and S. Howick, “Integrating system dynamics and fuzzy logic modelling for construction risk management,” *Constr. Manag. Econ.*, vol. 26, no. 11, pp. 1197–1212, 2008, doi: 10.1080/01446190802459924.
- [6] M. M. Herrera, M. Becerra Fernández, O. Romero, and J. Orjuela Castro, *USING SYSTEM DYNAMICS AND FUZZY LOGIC TO ASSESS THE IMPLEMENTATION RFID TECHNOLOGY*. 2014.
- [7] M. Bastan, R. Ramazani Khorshiddost, S. Delshad, and A. Ahmadvand, “Sustainable development of agriculture: A system dynamics model,” *Kybernetes*, vol. 47, Dec. 2017, doi: 10.1108/K-01-2017-0003.
- [8] C. Zhang and P. Guo, “A generalized fuzzy credibility-constrained linear fractional programming approach for optimal irrigation water allocation under uncertainty,” *J. Hydrol.*, vol. 553, pp. 735–749, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.08.008.
- [9] C. Dong, G. Huang, G. Cheng, and S. Zhao, “Water Resources and Farmland

- Management in the Songhua River Watershed under Interval and Fuzzy Uncertainties,” *Water Resour. Manag.*, vol. 32, no. 13, pp. 4177–4200, Oct. 2018, doi: 10.1007/s11269-018-2035-0.
- [10] R. Wieland and C. Gutzler, “Environmental impact assessment based on dynamic fuzzy simulation,” *Environ. Model. Softw.*, vol. 55, pp. 235–241, May 2014, doi: 10.1016/j.envsoft.2014.02.001.
- [11] S. Kouro and R. Musalem, “Control mediante lógica difusa,” *Técnicas Mod. Autom.*, pp. 1–7, 2002, [Online]. Available: <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo377/documentos/Fuzzy.pdf>.
- [12] D. Hu, L. Li, Y. Li, M. Li, H. Zhang, and M. Zhao, “Gas equilibrium regulation by closed-loop photo bioreactor built on system dynamics, fuzzy inference system and computer simulation,” *Comput. Electron. Agric.*, vol. 103, pp. 114–121, 2014, doi: 10.1016/j.compag.2014.02.002.
- [13] E. Kayacan, E. Kayacan, H. Ramon, O. Kaynak, and W. Saeys, “Towards agrobots: Trajectory control of an autonomous tractor using type-2 fuzzy logic controllers,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 20, no. 1, pp. 287–298, 2015, doi: 10.1109/TMECH.2013.2291874.
- [14] “fenología | Definición de fenología - «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario.” <https://dle.rae.es/?id=HI5OPKj> (accessed Sep. 12, 2019).
- [15] J. O. Orduz-Rodríguez and D. L. Garzón C., “Alternancia de la producción y comportamiento fenológico de la naranja ‘Valencia’ (*Citrus sinensis* [L.] Osbeck) en el trópico bajo húmedo de Colombia,” *Corpoica Cienc. y Tecnol. Agropecu.*, vol. 13, no. 2, p. 136, Jan. 2013, doi: 10.21930/rcta.vol13_num2_art:248.
- [16] M. H. ur Rahman *et al.*, “Application of CSM-CROPGRO-Cotton model for cultivars and optimum planting dates: Evaluation in changing semi-arid climate,” *F. Crop. Res.*, vol. 238, pp. 139–152, May 2019, doi: 10.1016/j.fcr.2017.07.007.
- [17] S. Ortega-Farias and C. Riveros-Burgos, “Modeling phenology of four

- grapevine cultivars (*Vitis vinifera* L.) in Mediterranean climate conditions,” *Sci. Hortic. (Amsterdam)*., vol. 250, pp. 38–44, May 2019, doi: 10.1016/j.scienta.2019.02.025.
- [18] N. Verdugo-Vásquez, C. P.-D. la Fuente, and S. Ortega-Farías, “Model Development to Predict Phenological scale of Table Grapes (cvs. Thompson, Crimson and Superior Seedless and Red Globe) using Growing Degree Days,” *OENO One*, vol. 51, no. 3, Sep. 2017, doi: 10.20870/OENO-ONE.2017.51.3.1833.
- [19] M. R. Anwar *et al.*, “Climate change impacts on phenology and yields of five broadacre crops at four climatologically distinct locations in Australia,” *Agric. Syst.*, vol. 132, pp. 133–144, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.agsy.2014.09.010.
- [20] M. Dettori, C. Cesaraccio, and P. Duce, “Simulation of climate change impacts on production and phenology of durum wheat in Mediterranean environments using CERES-Wheat model,” *F. Crop. Res.*, vol. 206, pp. 43–53, May 2017, doi: 10.1016/j.fcr.2017.02.013.
- [21] V. Gonzalez-Dugo, C. Ruz, L. Testi, F. Orgaz, and E. Fereres, “The impact of deficit irrigation on transpiration and yield of mandarin and late oranges,” *Irrig. Sci.*, vol. 36, no. 4–5, pp. 227–239, Sep. 2018, doi: 10.1007/s00271-018-0579-7.
- [22] S. A. Anjum *et al.*, “Growth and developmental responses of crop plants under drought stress: a review,” *Zemdirbyste-Agriculture*, vol. 104, no. 3, pp. 267–276, 2017, doi: 10.13080/z-a.2017.104.034.
- [23] G. Egea, P. A. Nortes, R. Domingo, A. Baille, A. Pérez-Pastor, and M. M. González-Real, “Almond agronomic response to long-term deficit irrigation applied since orchard establishment,” *Irrig. Sci.*, vol. 31, no. 3, pp. 445–454, 2013, doi: 10.1007/s00271-012-0322-8.
- [24] C. Patanè, S. Tringali, and O. Sortino, “Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid Mediterranean climate conditions,” *Sci. Hortic. (Amsterdam)*., vol. 129, no. 4, pp. 590–596, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.scienta.2011.04.030.

- [25] L. C. Santos *et al.*, “Influence of deficit irrigation on accumulation and partitioning of sugarcane biomass under drip irrigation in commercial varieties,” *Agric. Water Manag.*, vol. 221, pp. 322–333, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.agwat.2019.05.013.
- [26] G. Lopez, C. Larrigaudière, J. Girona, M. H. Behboudian, and J. Marsal, “Fruit thinning in ‘Conference’ pear grown under deficit irrigation: Implications for fruit quality at harvest and after cold storage,” *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, vol. 129, no. 1, pp. 64–70, May 2011, doi: 10.1016/j.scienta.2011.03.007.
- [27] Y. Selahvarzi, Z. Zamani, R. Fatahi, and A. R. Talaei, “Effect of deficit irrigation on flowering and fruit properties of pomegranate (*Punica granatum* cv. Shahvar),” *Agric. Water Manag.*, vol. 192, pp. 189–197, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.agwat.2017.07.007.
- [28] D. D. Tarkalson and B. A. King, “Effect of deficit irrigation timing on sugarbeet,” *Agron. J.*, vol. 109, no. 5, pp. 2119–2127, Sep. 2017, doi: 10.2134/agronj2017.01.0061.
- [29] C. D. Yonts, A. Haghverdi, D. L. Reichert, and S. Irmak, “Deficit irrigation and surface residue cover effects on dry bean yield, in-season soil water content and irrigation water use efficiency in western Nebraska high plains,” *Agric. Water Manag.*, vol. 199, pp. 138–147, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.agwat.2017.12.024.
- [30] M. Gheysari *et al.*, “Comparison of deficit irrigation management strategies on root, plant growth and biomass productivity of silage maize,” *Agric. Water Manag.*, vol. 182, pp. 126–138, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.agwat.2016.12.014.
- [31] T. A. Abd El-Mageed and W. M. Semida, “Organo mineral fertilizer can mitigate water stress for cucumber production (*Cucumis sativus* L.),” *Agric. Water Manag.*, vol. 159, pp. 1–10, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.agwat.2015.05.020.
- [32] M. Kifle and T. G. Gebretsadikan, “Yield and water use efficiency of furrow irrigated potato under regulated deficit irrigation, Atsibi-Wemberta, North Ethiopia,” *Agric. Water Manag.*, vol. 170, pp. 133–139, May 2016, doi:

10.1016/j.agwat.2016.01.003.

- [33] W. Bao, Y. Gu, W. Si, L. Hou, J. Lu, and Q. Luo, "Application of rainfall dynamic system response curve method for streamflow and sediment simulation in loess region," *Hupo Kexue/Journal Lake Sci.*, vol. 32, no. 2, pp. 528–538, Mar. 2020, doi: 10.18307/2020.0221.
- [34] M. W. Sima, Q. X. Fang, Z. Qi, and Q. Yu, "Direct assimilation of measured soil water content in Root Zone Water Quality Model calibration for deficit-irrigated maize," *Agron. J.*, vol. 112, no. 2, pp. 844–860, Mar. 2020, doi: 10.1002/agj2.20088.
- [35] S. Chen, Z. Huo, X. Xu, and G. Huang, "A conceptual agricultural water productivity model considering under field capacity soil water redistribution applicable for arid and semi-arid areas with deep groundwater," *Agric. Water Manag.*, vol. 213, pp. 309–323, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.agwat.2018.10.024.
- [36] H. Chen *et al.*, "Determining the spatial distribution of percolation for winter wheat based on system dynamics and semi-distributed modelling†," *Irrig. Drain.*, Apr. 2020, doi: 10.1002/ird.2440.
- [37] M. Pejic Bach, E. Tustanovski, A. W. H. Ip, K. L. Yung, and V. Roblek, "System dynamics models for the simulation of sustainable urban development: A review and analysis and the stakeholder perspective," *Kybernetes*, vol. 49, no. 2, pp. 460–504, Jun. 2019, doi: 10.1108/K-04-2018-0210.
- [38] J. Sušnik *et al.*, "Multi-stakeholder development of a serious game to explore the water-energy-food-land-climate nexus: The SIM4NEXUS approach," *Water (Switzerland)*, vol. 10, no. 2, Feb. 2018, doi: 10.3390/w10020139.
- [39] Y. Alifujiang, J. Abuduwaili, L. Ma, A. Samat, and M. Groll, "System dynamics modeling of water level variations of lake Issyk-Kul, Kyrgyzstan," *Water (Switzerland)*, vol. 9, no. 12, p. 989, Dec. 2017, doi: 10.3390/w9120989.
- [40] H. Jeong and J. Adamowski, "A system dynamics based socio-hydrological model for agricultural wastewater reuse at the watershed scale," *Agric. Water Manag.*, vol. 171, pp. 89–107, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.agwat.2016.03.019.
- [41] Y. Tang and X. Li, "Simulating effects of precipitation and initial planting

- density on population size of Mongolian pine in the Horqin Sandy Land, China,” *Agrofor. Syst.*, vol. 92, no. 1, pp. 1–9, Feb. 2018, doi: 10.1007/s10457-016-0004-2.
- [42] I. Mesgari, M. S. Jabalameli, and F. Barzinpour, “System dynamics modeling for national agricultural system with policy recommendations: Application to Iran,” *Pakistan J. Agric. Sci.*, vol. 54, no. 2, pp. 457–466, Jun. 2017, doi: 10.21162/PAKJAS/17.5476.
- [43] C. E. Vincenot, F. Carteni, S. Mazzoleni, M. Rietkerk, and F. Giannino, “Spatial self-organization of vegetation subject to climatic stress—insights from a system dynamics—individual-based hybrid model,” *Front. Plant Sci.*, vol. 7, no. MAY2016, May 2016, doi: 10.3389/fpls.2016.00636.
- [44] G. Distefano, A. Gentile, A. Hedhly, and S. La Malfa, “Temperatures during flower bud development affect pollen germination, self-incompatibility reaction and early fruit development of clementine (*Citrus clementina* Hort. ex Tan.),” *Plant Biol.*, vol. 20, no. 2, pp. 191–198, Mar. 2018, doi: 10.1111/plb.12656.
- [45] X. Ye and K. Sakai, “A new modified resource budget model for nonlinear dynamics in citrus production,” *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 87, pp. 51–60, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.chaos.2016.03.016.
- [46] S. E. P. Paulino, F. D. A. A. Mourão Filho, A. D. H. N. Maia, T. E. C. Avilés, and D. D. Neto, “Agrometeorological models for ‘Valencia’ and ‘Hamlin’ sweet oranges to estimate the number of fruits per plant,” *Sci. Agric.*, vol. 64, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2007, doi: 10.1590/S0103-90162007000100001.
- [47] A. N. Martins and A. A. Ortolani, “Estimativa de produção de laranja valência pela adaptação de um modelo agrometeorológico,” *Bragantia*, vol. 65, no. 2, pp. 355–361, 2006, doi: 10.1590/s0006-87052006000200018.
- [48] N. Ben Mechlia and J. J. Carroll, “Agroclimatic modeling for the simulation of phenology, yield and quality of crop production - I. Citrus response formulation,” *Int. J. Biometeorol.*, vol. 33, no. 1, pp. 36–51, Mar. 1989, doi: 10.1007/BF01045896.
- [49] G. Fernández Lambert, A. Aguilar Lasserre, C. Azzaro-Pantel, M. A. Miranda-

- Ackerman, R. Purroy Vázquez, and M. del Rosario Pérez Salazar, "Behavior patterns related to the agricultural practices in the production of Persian lime (*Citrus latifolia* tanaka) in the seasonal orchard," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 116, pp. 162–172, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.compag.2015.06.007.
- [50] Prodsol International Ltd & Gary Bartlett y Bartlett Lynne, "System Dynamics." <http://www.patternthinking.com/origins/system-dynamics.html>.
- [51] "Las Grandes preguntas vienen en Racimos, por lo tanto deben abordarse sistémicamente," vol. 2, 2014, Accessed: Nov. 02, 2019. [Online]. Available: https://mailuis-my.sharepoint.com/:w:/r/personal/handrade_uis_edu_co/_layouts/15/Doc.aspx?sourcedoc=%7B313F38C6-BEAE-45D0-9E1F-6D5B64956988%7D&file=MarioBunge2014_V2.docx&action=default&mobileredirect=true.
- [52] L. A. Zadeh, "Fuzzy S e t s *," 1965.
- [53] Iñaki Morlán Santa Catalina, "La Dinámica de Sistemas," Universidad del Pais Vasco.
- [54] C. G. Morcillo, "Lógica Difusa Una introducción práctica Técnicas de Softcomputing."
- [55] L. A. Zadeh, "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. SMC-3, no. 1, pp. 28–44, 1973, doi: 10.1109/TSMC.1973.5408575.
- [56] R. Alberto and M. Pérez, "Sistemas de inferencia basados en Lógica Borrosa: Fundamentos y caso de estudio."
- [57] A. J. Andrade, H. H., Lince, E., Hernandez, A. E., Monsalve, "Evolucion." 2010.
- [58] R. S. Hugo Hernando Andrade Sosa, Isaac Dyner Rezonzev, Ángela Espinosa, Hernán López Garay, *Pensamiento sistémico: Diversidad en Búsqueda de Unidad*. 2001.
- [59] F. Javier, S. San, and R.----D. Geología, "Cálculo de la Evapotranspiración Potencial mediante la fórmula de Hargreaves." Accessed: Apr. 02, 2020. [Online]. Available: <http://hidrologia.usal.xn--espg-7na.1>.

- [60] "6. TEXTURA DEL SUELO." http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm (accessed Apr. 04, 2020).
- [61] "Modulo 1: Cálculo de la lámina de riego primer parte - YouTube." <https://www.youtube.com/watch?v=hs9edqD3eP8&t=473s> (accessed Apr. 11, 2020).
- [62] "Modulo 1: Cálculo de la lámina de riego segunda parte - YouTube." <https://www.youtube.com/watch?v=8iTUXfXZLpw&t=745s> (accessed Apr. 11, 2020).
- [63] "Propiedades de los suelos arenosos - Grupo SACSA." <http://www.gruposacsa.com.mx/propiedades-de-los-suelos-arenosos/> (accessed Apr. 13, 2020).
- [64] "Suelo limoso - EcuRed." https://www.ecured.cu/Suelo_limoso (accessed Apr. 14, 2020).
- [65] "Características del suelo arcilloso - Grupo SACSA." <http://www.gruposacsa.com.mx/caracteristicas-del-suelo-arcilloso/> (accessed Apr. 14, 2020).
- [66] "El suelo de cultivo y las condiciones climáticas. AGAH0108 - Capítulo 1 Suelos." <http://reader.digitalbooks.pro/book/preview/18800/c1.html?1586955655834> (accessed Apr. 15, 2020).
- [67] FAO, "Glosario de terminos sobre humedad de suelo." <http://www.fao.org/3/y4690s/y4690s02.htm> (accessed Apr. 14, 2020).
- [68] "EL SUELO, DIFERENCIAS SEGÚN SU ASPECTO FÍSICO Y QUÍMICO." <http://www.fao.org/3/ah645s/AH645S04.htm> (accessed Apr. 13, 2020).
- [69] FAO, "Evapotranspiración de cultivo-Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. (FAO estudio para riego y drenaje)," vol. 56, p. 277, Accessed: Apr. 11, 2020. [Online]. Available: <http://www.fao.org/3/a-x0490s.pdf>.
- [70] "Principios agronómicos | Yara Argentina." <https://www.yara.com.ar/nutricion->

- vegetal/citricos/principios-agronomicos/ (accessed Apr. 02, 2020).
- [71] “Nitrógeno en la producción de cítricos | Yara Colombia.” <https://www.yara.com.co/nutricion-vegetal/citricos/nitrogeno-en-la-produccion-de-citricos/> (accessed Jul. 15, 2020).
- [72] “Fósforo en la producción de cítricos | Yara Colombia.” <https://www.yara.com.co/nutricion-vegetal/citricos/fosforo-en-la-produccion-de-citricos/> (accessed Jul. 15, 2020).
- [73] “Potasio en la producción de cítricos | Yara Colombia.” <https://www.yara.com.co/nutricion-vegetal/citricos/potasio-en-la-produccion-de-citricos/> (accessed Jul. 15, 2020).
- [74] J. Pérez, V. Catedrático De Estructuras, E. T. S. A. De, and L. Coruña, “CONCEPTOS GENERALES DE LA MECÁNICA DEL SUELO CONCEPTOS GENERALES DE LA MECÁNICA DEL SUELO CONCEPTOS GENERALES DE LA MECÁNICA DEL SUELO INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA DEL SUELO.”
- [75] J. Orlando Orduz Itodrlguaz, “EL CULTIVO DE LOS CITRICOS.”
- [76] “Determinación del estado hídrico del suelo con la finalidad del riego | UPV - YouTube.” https://www.youtube.com/watch?v=kYBu_qUvZP4 (accessed Apr. 02, 2020).
- [77] “Laboratorio virtual: peso específico de un suelo – El blog de Víctor Yepes.” <https://victoryepes.blogs.upv.es/2015/04/10/laboratorio-virtual-peso-especifico-de-un-suelo/> (accessed Apr. 02, 2020).
- [78] “Minimum Temperatures for a Citrus Tree | Home Guides | SF Gate.” <https://homeguides.sfgate.com/minimum-temperatures-citrus-tree-59616.html> (accessed Apr. 02, 2020).
- [79] “Evapotranspiración de referencia (ET o).”
- [80] A. (Frederick A. Ford, *Modeling the environment*. Island Press, 2010.
- [81] J. Sterman, *Business dynamics : systems thinking and modeling for a complex world*. .
- [82] U. N. de Colombia, “Relaciones gravimétricas y volumétricas del suelo.”

Accessed: Apr. 11, 2020. [Online]. Available: http://bdigital.unal.edu.co/53252/11/relacionesgravimetricasyvolumetricasdel_suelo.pdf.

- [83] Garcia, *FENOLOGÍA DEL CULTIVO DEL MANGO (Mangifera indica L.) Bases conceptuales para su manipulación*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, 2010.
- [84] “Evapotranspiration: From Measurements to Agricultural and Environmental ... - Google Books.”
https://books.google.com.co/books?id=JGmQDwAAQBAJ&pg=PA193&dq=CWSI+ETC+ETO&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwjzmuDs7c_qAhWhTd8KH7LB4QQ6AEwAHoECAAQAg#v=onepage&q=CWSI+ETC+ETO&f=false (accessed Jul. 15, 2020).
- [85] “Agua y agronomía - Google Libros.”
https://books.google.com.co/books?id=tWkJAQAAQBAJ&pg=PA159&dq=calculo+de+cwsi+por+evapotranspiración&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjQh9W39M_qAhWimuAKHatZBmwQ6AEwAHoECAUQAg#v=onepage&q=calculo+de+cwsi+por+evapotranspiración&f=false (accessed Jul. 15, 2020).
- [86] J. O. O. Diana Lucía Garzón Correa, Javier Vélez-Sánchez, “Efecto del déficit hídrico en el crecimiento y desarrollo de frutos de naranja valencia (*Citrus sinensis* Osbeck) en el piedemonte del Meta, Colombia.”
<http://www.scielo.org.co/pdf/acag/v62n2/v62n2a07.pdf> (accessed Jul. 15, 2020).
- [87] “Serie Lasallista Investigación y Ciencia CÍTRICOS: CULTIVO, POSCOSECHA E INDUSTRIALIZACIÓN.”
- [88] “Incrementar la cantidad de frutos en cítricos | Yara Colombia.”
<https://www.yara.com.co/nutricion-vegetal/citricos/incrementar-la-cantidad-de-frutos-en-citricos/> (accessed Jul. 15, 2020).
- [89] “Formación humana y capacitación - Humberto R. Maturana, Sima Nisis de Rezepka - Google Libros.”

https://books.google.com.co/books/about/Formaci3n_humana_y_capacitaci3n.html?id=PSS6AAAAIAAJ&redir_esc=y (accessed Oct. 14, 2020).

- [90] D. Moreira and C. C. Castro, "Adaptaci3n del cultivo de mango al cambio clim3tico. En una finca ubicada en el pacifico norte de Costa Rica." <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/3020/BVE17068938e.pdf;jsessionid=27EED486898C7731E8C5085E16EA9B7E?sequence=1> (accessed Nov. 21, 2020).
- [91] "Ministerio de Ambiente e IDEAM presentan el avance del Estudio Nacional del Agua (ENA- 2018) - NOTICIAS - IDEAM." http://www.ideam.gov.co/web/sala-de-prensa/noticias/-/asset_publisher/LdWW0ECY1uxz/content/ministerio-de-ambiente-e-ideam-presentan-el-avance-del-estudio-nacional-del-agua-ena-2018- (accessed Nov. 09, 2020).

BIBLIOGRAFÍA

6. TEXTURA DEL SUELO [WWW Document], n.d. URL http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm (accessed 4.4.20).

Abd El-Mageed, T.A., Semida, W.M., 2015. Organo mineral fertilizer can mitigate water stress for cucumber production (*Cucumis sativus* L.). *Agric. Water Manag.* 159, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.05.020>

Agua y agronomía - Google Libros [WWW Document], n.d. URL https://books.google.com.co/books?id=tWkJAQAQBAJ&pg=PA159&dq=calculo+de+cwsi+por+evapotranspiración&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjQh9W39M_qAhWimuAKHatZBmwQ6AEwAHoECAUQAg#v=onepage&q=calculo+de+cwsi+por+evapotranspiración&f=false (accessed 7.15.20).

Alberto, R., Pérez, M., n.d. *Sistemas de inferencia basados en Lógica Borrosa: Fundamentos y caso de estudio.*

Alifujiang, Y., Abuduwaili, J., Ma, L., Samat, A., Groll, M., 2017. System dynamics modeling of water level variations of lake Issyk-Kul, Kyrgyzstan. *Water (Switzerland)* 9, 989. <https://doi.org/10.3390/w9120989>

Andrade, H. H., Lince, E., Hernandez, A. E., Monsalve, A.J., 2010. *Evolucion.*

Anjum, S.A., Ashraf, U., Zohaib, A., Tanveer, M., Naeem, M., Ali, I., Nazir, U., Tabassum, T., 2017. Growth and developmental responses of crop plants under drought stress: a review. *Zemdirbyste-Agriculture* 104, 267–276.

<https://doi.org/10.13080/z-a.2017.104.034>

Anwar, M.R., Liu, D.L., Farquharson, R., Macadam, I., Abadi, A., Finlayson, J., Wang, B., Ramilan, T., 2015. Climate change impacts on phenology and yields of five broadacre crops at four climatologically distinct locations in Australia. *Agric. Syst.* 132, 133–144. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.09.010>

Bao, W., Gu, Y., Si, W., Hou, L., Lu, J., Luo, Q., 2020. Application of rainfall dynamic system response curve method for streamflow and sediment simulation in loess region. *Hupo Kexue/Journal Lake Sci.* 32, 528–538. <https://doi.org/10.18307/2020.0221>

Bastan, M., Ramazani Khorshiddost, R., Delshad, S., Ahmadvand, A., 2017. Sustainable development of agriculture: A system dynamics model. *Kybernetes* 47. <https://doi.org/10.1108/K-01-2017-0003>

Biblioteca IDEAM Koha › Detalles de: Estudio Nacional del Agua 2018. [WWW Document], n.d. URL <http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=38335> (accessed 11.9.20).

Características del suelo arcilloso - Grupo SACSA [WWW Document], n.d. URL <http://www.gruposacsa.com.mx/caracteristicas-del-suelo-arcilloso/> (accessed 4.14.20).

Chen, H., Zeng, W., Chen, W., Dai, W., Mi, B., Liu, J., Lei, G., 2020. Determining the spatial distribution of percolation for winter wheat based on system dynamics and semi-distributed modelling†. *Irrig. Drain.* <https://doi.org/10.1002/ird.2440>

Chen, S., Huo, Z., Xu, X., Huang, G., 2019. A conceptual agricultural water productivity model considering under field capacity soil water redistribution applicable for arid and semi-arid areas with deep groundwater. *Agric. Water Manag.*

213, 309–323. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.024>

Colombia, U.N. de, n.d. Relaciones gravimétricas y volumétricas del suelo.

Determinación del estado hídrico del suelo con la finalidad del riego | | UPV - YouTube [WWW Document], n.d. URL https://www.youtube.com/watch?v=kYBu_qUvZP4 (accessed 4.2.20).

Dettori, M., Cesaraccio, C., Duce, P., 2017. Simulation of climate change impacts on production and phenology of durum wheat in Mediterranean environments using CERES-Wheat model. F. Crop. Res. 206, 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.02.013>

Diana Lucía Garzón Correa, Javier Vélez-Sánchez, J.O.O., n.d. Efecto del déficit hídrico en el crecimiento y desarrollo de frutos de naranja valencia (*Citrus sinensis* Osbeck) en el piedemonte del Meta, Colombia [WWW Document]. URL <http://www.scielo.org.co/pdf/acag/v62n2/v62n2a07.pdf> (accessed 7.15.20).

Distefano, G., Gentile, A., Hedhly, A., La Malfa, S., 2018. Temperatures during flower bud development affect pollen germination, self-incompatibility reaction and early fruit development of clementine (*Citrus clementina* Hort. ex Tan.). Plant Biol. 20, 191–198. <https://doi.org/10.1111/plb.12656>

Dong, C., Huang, G., Cheng, G., Zhao, S., 2018. Water Resources and Farmland Management in the Songhua River Watershed under Interval and Fuzzy Uncertainties. Water Resour. Manag. 32, 4177–4200. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2035-0>

Egea, G., Nortes, P.A., Domingo, R., Baille, A., Pérez-Pastor, A., González-Real, M.M., 2013. Almond agronomic response to long-term deficit irrigation applied since orchard establishment. Irrig. Sci. 31, 445–454. <https://doi.org/10.1007/s00271-012->

0322-8

EL SUELO, DIFERENCIAS SEGÚN SU ASPECTO FÍSICO Y QUÍMICO [WWW Document], n.d. URL <http://www.fao.org/3/ah645s/AH645S04.htm> (accessed 4.13.20).

El suelo de cultivo y las condiciones climáticas. AGAH0108 - Capítulo 1 Suelos [WWW Document], n.d. URL <http://reader.digitalbooks.pro/book/preview/18800/c1.html?1586955655834> (accessed 4.15.20).

Evapotranspiración de referencia (ET o), n.d.

Evapotranspiration: From Measurements to Agricultural and Environmental ... - Google Books [WWW Document], n.d. URL https://books.google.com.co/books?id=JGmQDwAAQBAJ&pg=PA193&dq=CWSI+ETC+ETO&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwjzmuDs7c_qAhWhTd8KHY7LB4QQ6AEwAHoECAAQAg#v=onepage&q=CWSI+ETC+ETO&f=false (accessed 7.15.20).

FAO, n.d. Glosario de terminos sobre humedad de suelo [WWW Document]. URL <http://www.fao.org/3/y4690s/y4690s02.htm> (accessed 4.14.20a).

FAO, n.d. Evapotranspiración de cultivo-Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. (FAO estudio para riego y drenaje) 56, 277.

fenología | Definición de fenología - «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario [WWW Document], n.d. URL <https://dle.rae.es/?id=HI5OPKj> (accessed 9.12.19).

Fernández Lambert, G., Aguilar Lasserre, A., Azzaro-Pantel, C., Miranda-Ackerman, M.A., Purroy Vázquez, R., del Rosario Pérez Salazar, M., 2015. Behavior patterns

related to the agricultural practices in the production of Persian lime (*Citrus latifolia* tanaka) in the seasonal orchard. *Comput. Electron. Agric.* 116, 162–172. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.06.007>

Ford, A. (Frederick A., 2010. *Modeling the environment*. Island Press.

Formación humana y capacitación - Humberto R. Maturana, Sima Nisis de Rezepka - Google Libros [WWW Document], n.d. URL https://books.google.com.co/books/about/Formación_humana_y_capacitación.html?id=PSS6AAAAIAAJ&redir_esc=y (accessed 10.14.20).

Fósforo en la producción de cítricos | Yara Colombia [WWW Document], n.d. URL <https://www.yara.com.co/nutricion-vegetal/citricos/fosforo-en-la-produccion-de-citricos/> (accessed 7.15.20).

Garcia, 2010. FENOLOGÍA DEL CULTIVO DEL MANGO(*Mangifera indica* L.) Bases conceptuales para su manipulación. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria.

Gheysari, M., Sadeghi, S.H., Loescher, H.W., Amiri, S., Zareian, M.J., Majidi, M.M., Asgarinia, P., Payero, J.O., 2017. Comparison of deficit irrigation management strategies on root, plant growth and biomass productivity of silage maize. *Agric. Water Manag.* 182, 126–138. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.12.014>

Gonzalez-Dugo, V., Ruz, C., Testi, L., Orgaz, F., Fereres, E., 2018. The impact of deficit irrigation on transpiration and yield of mandarin and late oranges. *Irrig. Sci.* 36, 227–239. <https://doi.org/10.1007/s00271-018-0579-7>

Herrera, M.M., Becerra Fernández, M., Romero, O., Orjuela Castro, J., 2014. USING SYSTEM DYNAMICS AND FUZZY LOGIC TO ASSESS THE IMPLEMENTATION RFID TECHNOLOGY.

Hu, D., Li, L., Li, Y., Li, M., Zhang, H., Zhao, M., 2014. Gas equilibrium regulation by closed-loop photo bioreactor built on system dynamics, fuzzy inference system and computer simulation. *Comput. Electron. Agric.* 103, 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.02.002>

Hugo Hernando Andrade Sosa, Isaac Dyner Rezonzev, Ángela Espinosa, Hernán López Garay, R.S., 2001. *Pensamiento sistémico: Diversidad en Búsqueda de Unidad*.

Iñaki Morlán Santa Catalina, n.d. *La Dinámica de Sistemas*. Universidad del Pais Vasco.

Incrementar la cantidad de frutos en cítricos | Yara Colombia [WWW Document], n.d. URL <https://www.yara.com.co/nutricion-vegetal/citricos/incrementar-la-cantidad-de-frutos-en-citricos/> (accessed 7.15.20).

Javier, F., San, S., Geología, R.---D., n.d. *Cálculo de la Evapotranspiración Potencial mediante la fórmula de Hargreaves*.

Jeong, H., Adamowski, J., 2016. A system dynamics based socio-hydrological model for agricultural wastewater reuse at the watershed scale. *Agric. Water Manag.* 171, 89–107. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.03.019>

Karavezyris, V., Timpe, K.P., Marzi, R., 2002. Application of system dynamics and fuzzy logic to forecasting of municipal solid waste. *Math. Comput. Simul.* 60, 149–158. [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(02\)00010-1](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(02)00010-1)

Kayacan, Erdal, Kayacan, Erkan, Ramon, H., Kaynak, O., Saeys, W., 2015. Towards agrobots: Trajectory control of an autonomous tractor using type-2 fuzzy logic controllers. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics* 20, 287–298. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2013.2291874>

Kifle, M., Gebretsadikan, T.G., 2016. Yield and water use efficiency of furrow irrigated potato under regulated deficit irrigation, Atsibi-Wemberta, North Ethiopia. *Agric. Water Manag.* 170, 133–139. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.01.003>

Kouro, S., Musalem, R., 2002. Control mediante lógica difusa. *Técnicas Mod. Autom.* 1–7.

Laboratorio virtual: peso específico de un suelo – El blog de Víctor Yepes [WWW Document], n.d. URL <https://victoryepes.blogs.upv.es/2015/04/10/laboratorio-virtual-peso-especifico-de-un-suelo/> (accessed 4.2.20).

Las Grandes preguntas vienen en Racimos, por lo tanto deben abordarse sistémicamente, 2014. 2.

Lopez, G., Larrigaudière, C., Girona, J., Behboudian, M.H., Marsal, J., 2011. Fruit thinning in “Conference” pear grown under deficit irrigation: Implications for fruit quality at harvest and after cold storage. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 129, 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.03.007>

Martínez Rojas, N., Andrade Sosa, H.H., 2016. Integración de la Lógica Difusa a la Dinámica de Sistemas para la selección de terrenos de cultivos agrícolas. *ELEMENTOS* 6, 149. <https://doi.org/10.15765/e.v6i6.842>

Martins, A.N., Ortolani, A.A., 2006. Estimativa de produção de laranja valência pela adaptação de um modelo agrometeorológico. *Bragantia*. <https://doi.org/10.1590/s0006-87052006000200018>

Mechlia, N. Ben, Carroll, J.J., 1989. Agroclimatic modeling for the simulation of phenology, yield and quality of crop production - I. Citrus response formulation. *Int. J. Biometeorol.* 33, 36–51. <https://doi.org/10.1007/BF01045896>

Mesgari, I., Jabalameli, M.S., Barzinpour, F., 2017. System dynamics modeling for national agricultural system with policy recommendations: Application to Iran. Pakistan J. Agric. Sci. 54, 457–466. <https://doi.org/10.21162/PAKJAS/17.5476>

MINAGRICULTURA, 2015. Revisión de Políticas Agrícolas de la OCDE: Colombia 2015, Revisión de Políticas Agrícolas de la OCDE: Colombia 2015. OECD. <https://doi.org/10.1787/9789264307063-es>

Minimum Temperatures for a Citrus Tree | Home Guides | SF Gate [WWW Document], n.d. URL <https://homeguides.sfgate.com/minimum-temperatures-citrus-tree-59616.html> (accessed 4.2.20).

Ministerio de Ambiente e IDEAM presentan el avance del Estudio Nacional del Agua (ENA- 2018) - NOTICIAS - IDEAM [WWW Document], n.d. URL http://www.ideam.gov.co/web/sala-de-prensa/noticias/-/asset_publisher/LdWW0ECY1uxz/content/ministerio-de-ambiente-e-ideam-presentan-el-avance-del-estudio-nacional-del-agua-ena-2018- (accessed 11.9.20).

Modulo 1: Cálculo de la lámina de riego primer parte - YouTube [WWW Document], n.d. URL <https://www.youtube.com/watch?v=hs9edqD3eP8&t=473s> (accessed 4.11.20).

Modulo 1: Cálculo de la lámina de riego segunda parte - YouTube [WWW Document], n.d. URL <https://www.youtube.com/watch?v=8iTUXfXZLpw&t=745s> (accessed 4.11.20).

Morcillo, C.G., n.d. Lógica Difusa Una introducción práctica Técnicas de Softcomputing.

Moreira, D., Castro, C.C., n.d. Adaptación del cultivo de mango al cambio climático. En una finca ubicada en el pacífico norte de Costa Rica. [WWW Document]. URL

<https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/3020/BVE17068938e.pdf;jsessionid=27EED486898C7731E8C5085E16EA9B7E?sequence=1> (accessed 11.21.20).

Nasirzadeh, F., Afshar, A., Khanzadi, M., Howick, S., 2008. Integrating system dynamics and fuzzy logic modelling for construction risk management. *Constr. Manag. Econ.* 26, 1197–1212. <https://doi.org/10.1080/01446190802459924>

Nitrógeno en la producción de cítricos | Yara Colombia [WWW Document], n.d. URL <https://www.yara.com.co/nutricion-vegetal/citricos/nitrogeno-en-la-produccion-de-citricos/> (accessed 7.15.20).

Orduz-Rodríguez, J.O., Garzón C., D.L., 2013. Alternancia de la producción y comportamiento fenológico de la naranja ‘Valencia’ (*Citrus sinensis* [L.] Osbeck) en el trópico bajo húmedo de Colombia. *Corpoica Cienc. y Tecnol. Agropecu.* 13, 136. https://doi.org/10.21930/rcta.vol13_num2_art:248

Orlando Orduz Itodrlguaz, J., n.d. EL CULTIVO DE LOS CITRICOS.

Ortega-Farias, S., Riveros-Burgos, C., 2019. Modeling phenology of four grapevine cultivars (*Vitis vinifera* L.) in Mediterranean climate conditions. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 250, 38–44. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.02.025>

Patanè, C., Tringali, S., Sortino, O., 2011. Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid Mediterranean climate conditions. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 129, 590–596. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.04.030>

Paulino, S.E.P., Mourão Filho, F.D.A.A., Maia, A.D.H.N., Avilés, T.E.C., Neto, D.D., 2007. Agrometeorological models for “Valencia” and “Hamlin” sweet oranges to estimate the number of fruits per plant. *Sci. Agric.* 64, 1–11. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162007000100001>

Pejic Bach, M., Tustanovski, E., Ip, A.W.H., Yung, K.L., Roblek, V., 2019. System dynamics models for the simulation of sustainable urban development: A review and analysis and the stakeholder perspective. *Kybernetes* 49, 460–504. <https://doi.org/10.1108/K-04-2018-0210>

Pérez, J., Catedrático De Estructuras, V., De, E.T.S.A., Coruña, L., n.d. CONCEPTOS GENERALES DE LA MECÁNICA DEL SUELO CONCEPTOS GENERALES DE LA MECÁNICA DEL SUELO CONCEPTOS GENERALES DE LA MECÁNICA DEL SUELO INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA DEL SUELO.

Potasio en la producción de cítricos | Yara Colombia [WWW Document], n.d. URL <https://www.yara.com.co/nutricion-vegetal/citricos/potasio-en-la-produccion-de-citricos/> (accessed 7.15.20).

Principios agronómicos | Yara Argentina [WWW Document], n.d. URL <https://www.yara.com.ar/nutricion-vegetal/citricos/principios-agronomicos/> (accessed 4.2.20).

Prodsol International Ltd & Gary Bartlett y Bartlett Lynne, n.d. System Dynamics [WWW Document]. URL <http://www.patternthinking.com/origins/system-dynamics.html>

Propiedades de los suelos arenosos - Grupo SACSA [WWW Document], n.d. URL <http://www.gruposacsa.com.mx/propiedades-de-los-suelos-arenosos/> (accessed 4.13.20).

Rahman, M.H. ur, Ahmad, A., Wajid, A., Hussain, M., Rasul, F., Ishaque, W., Islam, M.A., Shelia, V., Awais, M., Ullah, A., Wahid, A., Sultana, S.R., Saud, S., Khan, S., Fahad, S., Hussain, S., Nasim, W., 2019. Application of CSM-CROPGRO-Cotton model for cultivars and optimum planting dates: Evaluation in changing semi-arid climate. *F. Crop. Res.* 238, 139–152. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.07.007>

Santos, L.C., Coelho, R.D., Barbosa, F.S., Leal, D.P.V., Fraga Júnior, E.F., Barros, T.H.S., Lizcano, J. V., Ribeiro, N.L., 2019. Influence of deficit irrigation on accumulation and partitioning of sugarcane biomass under drip irrigation in commercial varieties. *Agric. Water Manag.* 221, 322–333. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.013>

Selahvarzi, Y., Zamani, Z., Fatahi, R., Talaei, A.R., 2017. Effect of deficit irrigation on flowering and fruit properties of pomegranate (*Punica granatum* cv. Shahvar). *Agric. Water Manag.* 192, 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.07.007>

Serie Lasallista Investigación y Ciencia CÍTRICOS: CULTIVO, POSCOSECHA E INDUSTRIALIZACIÓN, n.d.

Sima, M.W., Fang, Q.X., Qi, Z., Yu, Q., 2020. Direct assimilation of measured soil water content in Root Zone Water Quality Model calibration for deficit-irrigated maize. *Agron. J.* 112, 844–860. <https://doi.org/10.1002/agj2.20088>

Sterman, J., n.d. *Business dynamics : systems thinking and modeling for a complex world*.

Suelo limoso - EcuRed [WWW Document], n.d. URL https://www.ecured.cu/Suelo_limoso (accessed 4.14.20).

Sušnik, J., Chew, C., Domingo, X., Mereu, S., Trabucco, A., Evans, B., Vamvakeridou-Lyroudia, L., Savić, D.A., Lapidou, C., Brouwer, F., 2018. Multi-stakeholder development of a serious game to explore the water-energy-food-land-climate nexus: The SIM4NEXUS approach. *Water (Switzerland)* 10. <https://doi.org/10.3390/w10020139>

Tang, Y., Li, X., 2018. Simulating effects of precipitation and initial planting density on population size of Mongolian pine in the Horqin Sandy Land, China. *Agrofor. Syst.*

92, 1–9. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-0004-2>

Tarkalson, D.D., King, B.A., 2017. Effect of deficit irrigation timing on sugarbeet. *Agron. J.* 109, 2119–2127. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.01.0061>

Verdugo-Vásquez, N., Fuente, C.P.-D. la, Ortega-Farías, S., 2017. Model Development to Predict Phenological scale of Table Grapes (cvs. Thompson, Crimson and Superior Seedless and Red Globe) using Growing Degree Days. *OENO One* 51. <https://doi.org/10.20870/OENO-ONE.2017.51.3.1833>

Vincenot, C.E., Carteni, F., Mazzoleni, S., Rietkerk, M., Giannino, F., 2016. Spatial self-organization of vegetation subject to climatic stress—insights from a system dynamics—individual-based hybrid model. *Front. Plant Sci.* 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00636>

Wieland, R., Gutzler, C., 2014. Environmental impact assessment based on dynamic fuzzy simulation. *Environ. Model. Softw.* 55, 235–241. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.02.001>

Ye, X., Sakai, K., 2016. A new modified resource budget model for nonlinear dynamics in citrus production. *Chaos, Solitons and Fractals* 87, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2016.03.016>

Yonts, C.D., Haghverdi, A., Reichert, D.L., Irmak, S., 2018. Deficit irrigation and surface residue cover effects on dry bean yield, in-season soil water content and irrigation water use efficiency in western Nebraska high plains. *Agric. Water Manag.* 199, 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.024>

Zadeh, L.A., 1973. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* SMC-3, 28–44. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.5408575>

Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy S e t s *, INFOR~ATIO~ AND CONTROL.

Zhang, C., Guo, P., 2017. A generalized fuzzy credibility-constrained linear fractional programming approach for optimal irrigation water allocation under uncertainty. J. Hydrol. 553, 735–749. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.08.008>

Anexo A. Ecuaciones del modelo de simulación.

Las ecuaciones del modelo de simulación se presentan en la Tabla 15, clasificadas por el tipo de variable, en paréntesis se presenta el nombre en el modelo de simulación.

Tabla 15. Ecuaciones del modelo de simulación

	Nombre de la variable	Unidades	Formula
Parámetros	Ancho del horizonte (Anchodelhorizonte)	Cm	150
	Densidad del agua (DensidadAgua)	$\frac{Kg}{L}$	1
	Inclinación del terreno (Inclinacióndelterreno)	grados	0
	Gravedad especifica (Gravedadespecifica)	Adimensional	2.7
	Inclinación del terreno (Inclinacióndelterreno)	grados	0
	Largo del horizonte (Largodelhorizonte)	Cm	150
	Peso específico del agua	$\frac{Ton}{m^3}$	1

	Nombre de la variable	Unidades	Formula
	(Peso específico de la agua)		
	Peso volumétrico sólido (Peso Volumetrico Sólido)	$\frac{Ton}{m^3}$	1.65
	Profundidad del horizonte (Profundidad del horizonte)	Cm	80
	Radiación solar extraterrestre (Radiación Solar Extraterrestre)	$\frac{mm}{dia}$	18.5
	Coeficiente único del cultivo (Kc)	Adimensional	0.65
	Relación de capacidad de campo (Relación CC)	Adimensional Porcentual	8
	Relación de punto de marchitez permanente (Relación PMP)	Adimensional Porcentual	4
	Temperatura media (Temp Media)	Grados Celsius	26.8

	Nombre de la variable	Unidades	Formula
	Variable temporal (VariableTemporal)	Día	1
	Temperatura máxima (tmax)	Grados Celsius	31.6
	Temperatura mínima (tmin)	Grados Celsius	23.0
	Tasa de Brotación (TasadeBrotación)	$\frac{1}{\text{día}}$	0.0032
	Perdidas de brotes (PerdidasdeBrotos)	Adimensional	0
	Variable temporal de brotes a frutos (VariableTemporalBrotosFruto)	Días	30
	Perdida de Frutos (PFrutos)	Adimensional	0
	Máximo Nitrógeno Admitido (MaxNAdmitido)	Gramos	1000
	Máximo Potasio Admitido (MaxKAdmitido)	Gramos	600
	Máximo Fosforo Admitido (MaxPAdmitido)	Gramos	65

	Nombre de la variable	Unidades	Formula
	Normalización de Salida (SalNormalizada)	Adimensional	100
Variables	Area (Area)	m^2	Anchodelhorizont *Largodelhorizon* 0.0001
	Conversión a litros (ConversiónaLitro)	$\frac{L}{dia}$	(Lluvia)*Area
	Coeficiente de Escorrentía (Coeficientedeescor)	Adimensional	1
	Evapotranspiración de referencia (ET0)	$\frac{mm}{dia}$	0.0023*(TempMe dia+17.78)*RadS olarExtraTer*SQ RT(tmax-tmin)
	Evapotranspiración de cultivo (ETC)	$\frac{L}{dia}$	(Kc*ET0)*Area
	Evapotranspiración bajo condiciones de estrés hídrico (ETCaj)	$\frac{L}{dia}$	ETC*Ks
	Coeficiente de estrés hídrico (Ks)	Adimensional	MIN(1, ((VolumenCapad Camp-

	Nombre de la variable	Unidades	Formula
			$\frac{\text{VolumenPMP} - (\text{VolumenCapadC} \cdot \text{amp} - \text{HorizontedeSuelo})}{((\text{VolumenCapadCamp} - \text{VolumenPMP}) - (\text{VolumenCapadCamp} - \text{Volfacilmentedis}))}$
	Masa de agua de la capacidad de campo (MasadeCCHorA)	Kg	$(\text{RelacionCC} * (\text{Masasueloseco} * 100)) / 100$
	Masa de agua en el punto de marchitez permanente (MasadelPMP)	Kg	$(\text{RelacionPMP} * (\text{Masasueloseco} * 100)) / 100$
	Masa del suelo seco (MasadeSueloSeco)	Ton	$(\text{Volumenfasesolid} * 0.000001) * \text{PesoVolumetricoS}$
	Relación pendiente flujo (RelaciónPendiente Flujo)	Adicional	$(\text{InclinacionTerre} * 0.5) / 45$

	Nombre de la variable	Unidades	Formula
	Volumen fácilmente disponible (VolFacilmentedisponible)	L	(VolumenCapadC amp+VolumenP MP)*0.5
	Volumen de agua acumulado (VolumenAcumulad o)	L	FronteraAirTierr+ HorizontedeSuelo - VolumenSaturaci o
	Volumen de la capacidad de campo (VolumenCapacidad deCampo)	L	MasadeCCHorA/ DensidadAgua
	Volumen del punto de marchitez permanente (VolumenPMP)	L	MasadeIPMP/De nsidadAgua
	Volumen de saturación (VolumenSaturación)	L	1000*(Volumenfa sesolid*0.000001 - VolumendeSolidos)
	Volumen de solidos (VolumenSolidos)	m^3	Masasueloseco/ Gravedadespecifi *PesEspAgua

	Nombre de la variable	Unidades	Formula
	Volumen de la fase solida (VolumenFaseSolid a)	cm^3	Anchodelhorizont *Profundidaddelh o*Largodelhorizo n
	Índice de estrés hidrico(CWSI)	Adimensional	1-(ETCaj/ETC)
	Promedio 5 días (Promedio5dias)	Adimensional	SUMARETARDO (RetardoInf_1)/(1 0*5)
	Promedio 15 días (Promedio15dias)	Adimensional	SUMARETARDO (RetardoInf_4)/(1 0*15)
	Absorción de Nitrógeno (AbsorcionN)	$\frac{g}{dia}$	(MaximoNAdmitid o/MaxFloracion)* NumFrutuniTemp
	Absorción de Potasio (AbsorcionK)	$\frac{g}{dia}$	(MaxKAdmit/Max Floracion)*NumFr utuniTemp
	Absorción de Fosforo (AbsorcionP)	$\frac{g}{dia}$	(MaxPAdmit/Max Floracion)*NumFr utuniTemp
	Nitrógeno Normalizado (NNorm)	Adimensional	MIN(Nitrogeno,M aximoNAdmitido)/ MaximoNAdmitid o

	Nombre de la variable	Unidades	Formula
	Potasio Normalizado (KNorm)	Adimensional	MIN(Potasio,Max KAdmit)/MaxKAdmit
	FosforoNormalizado (PNorm)	Adimensional	MIN(Fosforo,Max PAdmit)/MaxPAdmit
	Salida Normalizada (SalNormalizada)	Adimensional	FIS_1_NUEVA_SALIDA_1/Normde Salida
Flujos	Escorrentía (Escorrentia)	$\frac{L}{dia}$	(Coeficiendeesco r/VariableTemporal)*MIN(Frontera AirTierr,MAX(VolumenAcumulado, 0))
	Evapotranspiración (EvapoTranspira)	$\frac{L}{dia}$	MIN(ETCaj,(1/VariableTemporal)*HorizontedeSuelo)
	Flujo sub-superfial de entrada (FSubsuperficialA)	$\frac{L}{dia}$	MIN(((1/VariableTemporal)*(VolumenSaturacio-HorizontedeSuelo),FlujoSubsuperEnt)

	Nombre de la variable	Unidades	Formula
	Flujo sub-superficial de salida (FluSubSuperA)	$\frac{L}{dia}$	(1/VariableTemporal)*MAX(RelaInfiltracion*RelacionPendFluj*(HorizontedeSuelo-VolumenCapadCamp),0)
	Flujo hídrico (FlujoHidrico)	$\frac{L}{dia}$	ConversionaLitro+Riego
	Percolación superficial (PercolaciónA)	$\frac{L}{dia}$	(1/VariableTemporal)*MIN(VolumenSaturacio-HorizontedeSuelo,FronteraAirTierr)
	Percolación profunda (PercolaciónProfunda)	$\frac{L}{dia}$	RelaInfiltracion*(1/VariableTemporal)*MAX((1-RelacionPendFluj)*(HorizontedeSuelo-VolumenCapadCamp),0)
	Brotación (Brotacion)	Brotes/día	((Tabla_1+Tabla_2)*MaxFloracion*

	Nombre de la variable	Unidades	Formula
			SalNormalizada* TasadeBrotación)
	Brotes en el Árbol (Brotes)	Brotes/día	((1- PerdBrotes)*Brot esPosPerd)/Varia bleTemporal
	Perdidas de Brotes (PBrotes)	Brotes/día	(BrotesPosPerd* PerdBrotes)/Varia bleTemporal
	Fructificación (Fructificación)	Frutos/día	Brotes/VarTempB rotaFrut
	PerdidasdeFrutos (PFrutos)	Frutos/día	PerdFrutos*Fruto sPosPerd/Variabl eTemporal
	Frutos en el árbol (FrutosenelArbol)	Frutos/día	((1- PerdFrutos)*Frut osPosPerd)/Varia bleTemporal
	Ingreso de Nitrógeno (IngresodeN)	g/día	NAgregado/Varia bleTemporal
	Flujo de Absorción de Nitrógeno (FlujoAbsN)	g/día	MIN(AbsorciónN, Nitrogeno/Variabl eTemporal)

	Nombre de la variable	Unidades	Formula
	Ingreso de Potasio (IngresodeK)	g/día	KAgregado/VariableTemporal
	Flujo de Absorción de Potasio (FlujoAbsK)	g/día	MIN(Potasio,AbsorciónK)/VariableTemporal
	Ingreso de Fosforo (IngresodeP)	g/día	PAgregado/VariableTemporal
	FlujodeAbsorciónde Fosforo (FlujoAbsP)	g/día	MIN(AbsorciónP, Fosforo)/VariableTemporal
Niveles	Frontera Aire Tierra (FronteraAirTierr)	L	0
	Horizonte de suelo (HorizonteA)	L	150
	MaxímaFloración (Maxfloración)	Flores	1000
	BrotesPosiblesPerdidas	Brotes	0
	Brotes	Brotes	0
	Frutos posibles perdidas (Brotesposperd)	Frutos	0
	Frutos (Frutos)	Frutos	0
	Nitrógeno (Nitrogeno)	g	1000

	Nombre de la variable	Unidades	Formula
	Potasio (Potasio)	g	600
	Fosforo (Fosforo)	g	65
Variables Exógenas	Riego (Riego)	$\frac{L}{dia}$	INTPASO(2,0,1,0,1000,1000,0,0,0,0,0,0,0)
	Lluvia (Lluvia)	$\frac{mm}{dia}$	INTPASO(2,0,1,8,8,8,8,8,8,0,0)
	FlujoSupSuperficial de entrada (FSubsubsuperfical A)	$\frac{L}{dia}$	Definición: INTPASO(1,0,1,0,0,0,0,0)
Tablas	Tabla1	Adimensional	INTPASO(2,-1,0.1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1)
	Tabla2	Adimensional	INTPASO(2,-1,0.1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1)
Retardos	RetardoInformación 1	Adimensional	RETARDO(CWSI,5,50,0)
	RetardoInformación 2	Adimensional	RETARDO(CWSI,15,150,0)

Fuente: Autor trabajo de grado

Anexos B. Vista del modelo de simulación

