

Instituto Tecnológico Superior de Xalapa

Subdirección de Posgrado e Investigación

Sistema experto para la selección y dosificación de  
fertilizantes en cultivos de maíz (*Zea mays*) para la zona  
montañosa central de Veracruz

# Tesis

Que presenta

José Rolando García Alba

Para la obtención del grado de:

Maestro en Sistemas Computacionales

Director:

Dr. Rodrigo Rodríguez Franco

Codirector:

M. C. María Angélica Cerdán

Xalapa-Enríquez Veracruz, a 23 de julio de 2024.

## Contenido

Índice de ilustraciones	6
Índice de tablas	6
1. Antecedentes	8
1.1 Identificación del problema	13
1.2 Objetivos	15
1.2.1 Objetivo general	15
1.2.2 Objetivos específicos	15
1.3 Justificación	15
1.4 Alcances y limitaciones	17
1.5 Pregunta de investigación	17
1.6 Hipótesis	17
1.7 Metodología	18
1.7.1 Proceso de investigación (RSL)	18
1.7.2 Metodología IDEAL	22
1.7.3 Evaluación cualitativa y cuantitativa	23
1.7.4 Proceso de mejora	24
1.8 Riesgos y consideraciones éticas	24
1.9 Herramientas de desarrollo	24
1.9.1 Drools	27
1.9.2 MariaDB	27
1.9.3 Angular	27
Capítulo 2: Marco teórico y de referencia	29
2.1 El maíz y su desarrollo	29
2.1.1 Importancia del maíz	29
2.1.2 Etapa vegetativa y reproductiva	30
2.1.3 Nutrientes	33
Fertilizantes	35
2.1.4 Fases de fertilización	37
2.2 Agricultura de precisión (AP)	38
2.2.1 Definición	38
2.2.2 Elementos de la AP	39
2.2.3 Aplicaciones	40
2.3. Sistemas Expertos (SE)	41

2.3.1 Definición	41
2.3.2 Elementos que lo conforman	41
2.3.3 Tipos	42
2.3.4 Aplicaciones	45
2.4 Sistemas basados en reglas	46
2.4.1 Estructura	46
2.4.2 Tipos	46
2.5 Métricas para evaluar sistemas expertos	47
2.5.1 Matriz de confusión	47
2.5.2 Métrica de exactitud	49
2.5.3 Métrica de exhaustividad/sensibilidad	49
2.5.4 Métrica de precisión	50
2.5.5 Puntuación F1	51
2.5 Análisis del estado del arte	52
Capítulo 3: Diseño del sistema basado en reglas	59
3.1 Estructura de la base de conocimiento	60
3.1.1 Variables óptimas y su importancia	62
3.1.2 Otras variables importantes	63
3.1.2.1 Clasificación de los suelos	63
3.1.2.2 Fertilización y tipos de fertilizante	64
3.1.2.3 Reglas para la base de conocimiento	65
3.1.2.4 El esquema de fertilización	67
3.2 Primer prototipo del sistema experto	68
3.2.1 Diseño de la base de datos	68
3.2.2 Arquitectura del sistema experto: cliente-servidor	69
3.2.3 Implementación en Drools	71
3.2.4 Interfaz del sistema	73
3.3 Primer diseño experimental	76
3.3.1 Clima	76
3.3.2 Parcela	76
3.3.3 Tratamientos	76
3.3.3 Mediciones de la planta	78
3.3.4 Riego	78
3.3.5 Resultados	78

Capítulo 4: Resultados	84
4.1 Proceso de mejora SE: segunda versión SE	84
4.2 Segundo experimento	85
4.2.1 Objetivo	86
4.2.2 Objetivos específicos	86
4.2.3 Ubicación	86
4.2.4 Extensión	86
4.2.5 Hidrografía	86
4.2.6 Clima	86
4.2.7 Uso de suelo y vegetación	88
4.2.8 Principales ecosistemas	88
4.2.9 Recursos naturales	88
4.2.10 Parcelas	88
4.2.10.1 Los Planes	88
4.2.10.1.1 Ubicación	88
4.2.10.1.2 Siembra	89
4.2.10.1.3 Análisis físico y fisicoquímico del suelo	90
4.2.10.1.4 Manejo agronómico del suelo	90
4.2.10.1.5 Tratamientos y fertilización	91
4.2.10.1.6 Análisis estadístico	92
4.2.10.2 Chapultepec	102
4.2.10.2.1 Ubicación	102
4.2.10.2.2 Siembra	103
4.2.10.2.3 Análisis físico y fisicoquímico del suelo	104
4.2.10.2.4 Manejo agronómico del suelo	105
4.2.10.2.5 Tratamientos y fertilización	105
4.2.10.2.6 Análisis estadístico	107
4.2.10.3 La Ventana	113
4.2.10.3.1 Ubicación	113
4.2.10.3.2 Siembra	113
4.2.10.3.3 Análisis físico y fisicoquímico del suelo	116
4.2.10.3.4 Manejo agronómico del suelo	117
4.2.10.3.5 Tratamientos y fertilización	117

4.2.10.3.6 Análisis estadístico	118
4.3 Variables evaluadas: Comparación de resultados	118
4.3.1 Durante el crecimiento	118
4.4.2 A la cosecha	118
4.4 Métricas para evaluar el algoritmo	119
4.4.1 Cuestionario	119
4.4.2 Resultados: métricas de evaluación	120
5 Conclusiones	120
6 Trabajo futuro	120
7 Referencias bibliográficas	120
Anexos	127
Cuestionario: Evaluación de reglas	127
Cuestionario: Evaluación de métricas	137

## Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Fase vegetativa y reproductiva del maíz. Fuente: ANDES, s.f.	30
Ilustración 2 Componentes de un SE. Elaboración propia.	40
Ilustración 3 Encadenamiento hacia adelante. Elaboración propia.	45
Ilustración 4 Encadenamiento hacia atrás. Elaboración propia.	45
Ilustración 5 Reunión instalaciones ITSX con la Dra. Rosa	61
Ilustración 6 Modelo relacional - base de datos SE	68
Ilustración 7 Arquitectura sistema experto	69
Ilustración 8 Reglas pH en Drools.	71
Ilustración 9 Reglas recomendación del tipo de fertilizante en Drools	72
Ilustración 10 Home SE.	72
Ilustración 11 Iniciar sesión SE.	73
Ilustración 12 Registrarse SE.	73
Ilustración 13 Recomendación.	74
Ilustración 14 Clasificación del suelo, recomendación de cantidad y tipo de fertilizante.	74
Ilustración 15 Sugerencia de esquema de fertilización: invernadero ITSX.	76
Ilustración 16 Altura de la planta durante 88 ddg: invernadero ITSX.	78
Ilustración 17 Diámetro del tallo durante 88 ddg: invernadero ITSX.	79
Ilustración 18 Historial de recomendaciones.	83
Ilustración 19 Ejemplo recomendación y clasificación del suelo.	84
Ilustración 20 Temperatura promedio mensual: 2023. Datos obtenidos de: Weather Spark, 2023.	86
Ilustración 21 Precipitación promedio mensual: 2023. Datos obtenidos de: Weather Spark, 2023.	86
Ilustración 22 Parcela en el predio de Los Planes.	89
Ilustración 23 Sugerencia de esquema de fertilización predio Los Planes.	91
Ilustración 24 Altura de la planta durante 88 ddg predio Los Planes.	95
Ilustración 25 Diámetro del tallo durante 88 ddg.	97
Ilustración 26 Parcela en el predio de Chapultepec	104
Ilustración 27 Parcela en el predio de Chapultepec	105

Ilustración 28 Esquema de fertilización: La Ventana.	107
Ilustración 29 Altura de la planta durante 88 ddg predio Chapultepec.	109
Ilustración 30 Diámetro del tallo durante 88 ddg predio Chapultepec.	110

## Índice de tablas

Tabla 1 Cosecha de maíz, ciclo de invierno 2022-2023. Fuente: SIAP.	15
Tabla 2 Principales municipios productores de maíz grano en Veracruz. Anuario estadístico 2023. Fuente SIAP (2024).	15
Tabla 3 Preguntas y sub-preguntas de investigación	25
Tabla 4 Términos de búsqueda y sinónimos	25
Tabla 5 Cadena base de búsqueda	25
Tabla 6 Resultados probando las diferentes cadenas de búsqueda	26
Tabla 7 Criterios de inclusión y exclusión	26
Tabla 8 Clasificación artículos	27
Tabla 9 Aporte nutrimental del maíz por cada 100g. Fuente: Alimento, 2020.	29
Tabla 10 Etapa fenológica, característica principal, número de días después de la siembra, altura de la planta. Fuente: Zaragoza y Fertilab (2019).	31
Tabla 11 Fertilizantes comúnmente empleados en la región de coacoatzintla.	36
Tabla 12 Fases de fertilización en el cultivo de maíz. Fuente Zaragoza & Fertilab (2019).	37
Tabla 13 Ventajas y desventajas de los diferentes sistemas expertos.	43
Tabla 14 Estructura matriz de confusión.	47
Tabla 15 Comparativa tecnologías para desarrollo del SE.	58
Tabla 16 Clasificación del pH según NOM-021-RECNAT-2000. Por SEMARNAT, 2000.	64
Tabla 17 Interpretación de resultados de nitrógeno según NOM-021-RECNAT-2000.	64
Tabla 18 Interpretación de resultados de fósforo según NOM-021-RECNAT-2000. Por SEMARNAT, 2000.	64
Tabla 19 Interpretación de resultados de potasio según NOM-021-RECNAT-2000. Por SEMARNAT, 2000.	64
Tabla 20 Reglas recomendación fertilizante.	67
Tabla 21 Propiedades químicas del suelo.	76
Tabla 22 Esquemas de fertilización en el invernadero del ITSX: tratamientos A y B.	76
Tabla 23 Resumen estadístico durante 88 ddg: altura de la planta, invernadero del ITSX.	78
Tabla 24 Resumen estadístico durante 88 ddg: diámetro del tallo, invernadero del ITSX.	79
Tabla 25 Resumen estadístico durante 88 ddg: diámetro del elote (mm).	80
Tabla 26 Resumen estadístico durante 88 ddg: largo del elote (cm).	80

Tabla 27 Resumen estadístico durante 88 ddg: número de granos por hilera.	81
Tabla 28 Resumen estadístico durante 88 ddg: granos totales.	81
Tabla 29 Resumen estadístico durante 88 ddg: peso del grano.	82
Tabla 30 Resumen estadístico durante 88 ddg: peso del elote.	82
Tabla 31 Características agronómicas del maíz A-7573. Adapta de ASGROW, s.f.	88
Tabla 32 Propiedades químicas del suelo: Los Planes.	90
Tabla 33 Esquemas fertilización Los Planes: Tratamientos A, B y C.	92
Tabla 34 Resumen estadístico durante 88 ddg: altura de la planta predio Los Planes.	95
Tabla 35 Resumen estadístico durante 88 ddg: diámetro del tallo (mm).	97
Tabla 36 Resumen estadístico durante 88 ddg: diámetro del elote (mm).	98
Tabla 37 Resumen estadístico durante 88 ddg: largo del elote (cm).	99
Tabla 38 Resumen estadístico durante 88 ddg: número de grano por hilera.	100
Tabla 39 Resumen estadístico durante 88 ddg: granos totales.	101
Tabla 40 Resumen estadístico durante 88 ddg: peso total del grano.	102
Tabla 41 Resumen estadístico durante 88 ddg: peso del elote.	103
Tabla 42 Resumen estadístico durante 88 ddg: peso del elote.	106
Tabla 43 Esquemas fertilización Chapultepec: Tratamientos A, B y C.	107
Tabla 44 Resumen estadístico durante 88 ddg: altura de la planta predio Chapultepec.	108
Tabla 45 Resumen estadístico durante 88 ddg: diámetro del tallo predio Chapultepec.	110
Tabla 46 Resumen estadístico durante 88 ddg: diámetro del elote predio Chapultepec.	111
Tabla 47 Resumen estadístico durante 88 ddg: largo del elote predio Chapultepec.	112
Tabla 48 Resumen estadístico durante 88 ddg: número de granos por hilera predio Chapultepec.	112
Tabla 49 Resumen estadístico durante 88 ddg: número de granos totales predio Chapultepec.	113
Tabla 50 Resumen estadístico durante 88 ddg: peso total del grano predio Chapultepec.	113
Tabla 51 Resumen estadístico durante 88 ddg: peso del elote predio Chapultepec.	114
Tabla 52 Escenario 1. Evaluación de métricas.	116
Tabla 53 Escenario 2. Evaluación de métricas.	116
Tabla 54 Escenario 3. Evaluación de métricas.	117
Tabla 55 Matriz de confusión: Resultados SE.	117



## Introducción

La agricultura moderna enfrenta desafíos significativos debido al crecimiento de la población mundial, proyectada a alcanzar 9,700 millones de habitantes para el año 2050. En este contexto, el maíz se destaca como uno de los cultivos más importantes a nivel global, siendo un pilar fundamental en la producción de alimentos y en la economía agrícola. México, como uno de los principales productores de maíz, juega un papel crucial en la producción mundial, y regiones como Veracruz son especialmente relevantes debido a su alta capacidad productiva.

El maíz no solo es vital para la alimentación, sino también para la estabilidad económica y social de muchas comunidades rurales. En este sentido, la aplicación de tecnologías avanzadas en la agricultura, como los sistemas expertos (SE) basados en inteligencia artificial, es esencial para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de los cultivos. Estos sistemas pueden proporcionar recomendaciones precisas sobre la fertilización, adaptándose a las necesidades específicas de cada terreno y optimizando el uso de recursos.

El presente estudio se enfoca en la implementación de un sistema experto para la recomendación de fertilizantes en el cultivo de maíz en dos localidades del municipio de Coacoatzintla, Veracruz: Los Planes y Chapultepec. En Los Planes, el SE clasificó el terreno como fuertemente ácido y salino, con altos niveles de nitrógeno y potasio, pero bajos en fósforo. A pesar de las recomendaciones del SE, el productor aplicó dosis excesivas de fertilizantes, lo que no resultó en los rendimientos esperados. El tratamiento C, que siguió las recomendaciones del SE, mostró mejores resultados en altura de planta, diámetro del tallo y elote, y peso total del grano. En Chapultepec, el tratamiento C también superó a los otros tratamientos en métricas clave como altura de planta y diámetro del elote, aunque no se observaron diferencias significativas en el diámetro del tallo. Estos resultados subrayan la importancia de fertilizar conforme a las necesidades específicas del terreno para optimizar el rendimiento agrícola y reducir los costos de producción.

Este estudio demuestra que la adopción de sistemas inteligentes en la agricultura puede mejorar significativamente la productividad y sostenibilidad de los cultivos de maíz,

beneficiando tanto a pequeños como medianos productores. La implementación de tecnologías avanzadas no solo incrementa los rendimientos, sino que también contribuye a una gestión más eficiente y responsable de los recursos agrícolas.

Este trabajo de tesis contempla 4 capítulos, en los cuales en el primer capítulo se describe la problemática, objetivo general, específicos, metodología y la justificación de la investigación.

En el segundo capítulo se hace una descripción del marco teórico, de los conceptos relacionados con el crecimiento del maíz, sus etapas, así como de la agricultura de precisión y los sistemas expertos, además de los resultados de la Revisión Sistemática de la Literatura.

En los capítulos 3 y 4, se presentan los prototipos desarrollados y sus resultados, así como el desarrollo de los experimentos desarrollados en campo, y sus resultados a través de un análisis de varianza, del mismo modo se hace una evaluación del algoritmo utilizado métricas de evaluación de modelos de aprendizaje.

## 1. Antecedentes

En la actualidad, el territorio mexicano dispone de una extensa variedad de frutas y verduras, en las distintas regiones del país. Hasta la fecha México posee un total de 32.4 millones de hectáreas destinadas a la cosecha (CONAGUA, 2022).

En este sentido, la agricultura en México es contemplada como una de las actividades económicas de mayor relevancia, ya que, genera gran cantidad de empleos en el país; es considerada el sector productivo más trascendental desde un punto de vista económico y social (Hidroponia, 2015).

Gracias a la variedad de climas en el territorio nacional, según la FAO, este país cultivó alrededor de 200 productos agrícolas. Entre los que destacan y siendo de consumo directo: frijol, trigo, sorgo, arroz, maíz, caña de azúcar y las oleaginosas (FAO, s.f.), en tanto, Veracruz es un importante productor de caña de azúcar, maíz, naranja, piña y limón.

De acuerdo con el documento elaborado por el Grupo Consultor de Mercados Agrícolas (GCMA), se estima que en 2024 México producirá 113.5 millones de toneladas de productos agroalimentarios, lo que representa un incremento anual del 1.7%. Con esta producción, México ocupará el undécimo lugar a nivel mundial. China continúa liderando el primer lugar con 1,499.6 millones de toneladas (GCMA, 2023).

En particular, la producción de maíz a nivel mundial es la más alta en comparación con otros cereales. Para el año 2023/2024, se estima una producción de 1.23 billones de toneladas métricas. La proyección muestra que Estados Unidos encabezará el primer lugar con 389.68 millones, seguido de China con 288.84 millones, y en el octavo lugar, México con 22.7 millones de toneladas métricas (USDA, 2024).

Considerando la información anterior, México es el octavo mayor productor de maíz. Además, desde 2016 hasta 2020, Estados Unidos ha sido el principal proveedor de maíz en grano para México. Las compras se concentran especialmente entre agosto y septiembre, cuando la productividad local disminuye (SIAP, 2021; USDA, 2020). Se espera que para el

año comercial 2023-2024, México importe alrededor de 18.2 millones de toneladas, 2 millones más que el curso anterior.

En el ámbito nacional, y desde el punto de vista de la SAGARPA (2017) “El maíz es el cultivo más representativo de México por su importancia económica, social y cultural”. Tan solo esta nación posee 64 razas de maíces nativas. En general una persona consume 196.4 kg de *Zea mays* blanco, principalmente en tortillas.

En términos reales la producción del maíz se fracciona en blanco y amarillo. El primero constituye el 86.94 %, reservado para el consumo humano. El segundo acumula el sobrante, asignado al sector de la industria (SAGARPA, 2017). Asimismo, esta secretaría hace hincapié que la mayoría del territorio mexicano tiene las condiciones idóneas para el cultivo de dicho cereal.

De las hectáreas cultivadas (7.76 millones) en el año 2016 se dio bajo las siguientes condiciones:

- La superficie no se encuentra mecanizada: 75.59%
- No se emplea tecnología enfocada a la sanidad vegetal: 65.06
- Contó con asistencia técnica: 30.16%
- Por modalidad de riego: 3.55%
- Riego por bombeo: 0.19%
- Otro tipo de riego: 45.25% y el restante es de temporada.

En la Tabla 1 se muestra la producción de maíz en toneladas métricas durante la cosecha del ciclo de invierno 2022/2023, que finalizó en septiembre. Los estados de Sinaloa, Veracruz, Sonora, Tamaulipas y Chiapas ocupan los primeros cinco lugares a nivel nacional. Aunque Veracruz se encuentra en el segundo lugar, presenta el segundo peor rendimiento entre estos cinco estados, solo superando a Chiapas y quedando muy por detrás de Sinaloa.

<b>Estado</b>	<b>Producción (ton)</b>	<b>Rendimiento (tm / ha)</b>
Sinaloa	6,485,273	12.54
Veracruz	514,830	2.57
Sonora	490,959	11.46
Tamaulipas	429,365	5.59
Chiapas	197,230	1.77

*Tabla 1 Cosecha de maíz, ciclo de invierno 2022-2023. Fuente: SIAP.*

Mientras tanto, a nivel estatal, la entidad veracruzana es considerada como uno de los estados de mayor posibilidad productiva. Principalmente en actividades agrícolas y pecuarias (INEGI, 2018).

Serratos (2009) destaca algunas razas de maíz que se cultivan en Veracruz: Tuxpeño, Celaya, Cónico, Cónico Norteño, Chalqueño, Elotes Cónicos, Elotes Occidentales, Olotillo, Bolita, Dzit-Bacal, Nal-Tel, Pepitilla, Mushito, entre otras.

Hasta el último anuario (2023) estadístico de la producción de maíz grano en la entidad Veracruzana, los principales municipios productores de maíz grano son:

<b>Municipio</b>	<b>Producción (ton)</b>
Soteapan	51,011.37
Minatitlán	50,820.16
Las Choapas	50,637.34
San Andrés Tuxtla	45,951.2
Isla	44,178.8
Hueyapan de Ocampo	43,810.12
Papantla	43,783.6
José Azueta	35,530.9
Tierra Blanca	35,257.38

Playa Vicente	32,669.99
---------------	-----------

Tabla 2 Principales municipios productores de maíz grano en Veracruz. Anuario estadístico 2023. Fuente SIAP (2024).

Como se aprecia en la tabla 2, la mayor concentración geográfica de productores se centra en la región sur de Veracruz, salvo Papantla ubicado en la región Totonaca.

Considerando la información antes expuesta, SAGARPA (2017) estima que para el 2030 el consumo de maíz grano tendrá un decremento de 23.67 MMT (Millones de Toneladas Métricas) a 22.86 MMT. Lo anterior no significa que la producción tenga que disminuir, en este caso se piensa que la producción pasará 24.56 a 42.81 MMt con respecto al *Zea mays* blanco. Tan solo, el consumo del maíz amarillo tendrá un aumento de casi 8.5 MMt. Hoy en día recurrir a técnicas y/o procesos de antaño para incrementar y mejorar la producción agrícola resulta limitado. Por ende, la agricultura de precisión (AP) en tiempos recientes abarca distintas técnicas y herramientas para mejorar el proceso de la agricultura. La AP tiene como objetivo sugerir las mejores recomendaciones para mejorar la toma de decisiones, en función del análisis de datos. Lo anterior, gracias al uso de las nuevas tecnologías como algoritmos de recomendación, Internet de las Cosas, Big data, Aprendizaje Automático, Inteligencia Artificial, etc (Pérez, 2021). La AP se compone de tres etapas, recolección de datos, análisis de datos e implementación, siendo esta última donde empresas o usuarios toman decisiones con base a predicciones o recomendaciones (Santillán & Rentería, s.f.)

Sin olvidar, y gracias a la globalización y al desarrollo de nuevas revoluciones vanguardistas, estas las podemos encontrar en diferentes áreas, más bien en todas. Pero a qué se refiere este término, las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC's) son instrumentos que se emplean para mejorar la toma de decisiones, automatizar procesos, manipular información. En pocas palabras las TIC's agrupan herramientas, equipos y tecnologías que permiten mejorar los procesos realizados por los humanos.

Por consiguiente, la inclusión de las TIC's en la agricultura permite automatizar y mejorar diferentes actividades. No sólo desde el punto de vista meteorológico, sino también a partir

de informaciones más complejas como la fertilidad del suelo, la genética de las semillas a sembrar o de los animales a criar (Brecha cero, 2017). Reforzando lo anterior Caro et al (2020) consideran; el gran soporte de esta disciplina (AP) es indudablemente las tecnologías de la información y la comunicación. Las TIC's permiten monitorear datos de los suelos y del clima, permitiendo conocer las variaciones y facilitando la aplicación de tratamientos con mayor exactitud.

Berger (2019) identifica que existen 4 tecnologías clave en la AP: imágenes y sensores, la robótica y la automatización, la digitalización y el big data (es preciso mencionar que muchos dispositivos de hardware suelen ser accesibles). Afirmando que tres de ellas trabajan de manera conjunta: sensores, automatización robótica y datos digitales. La tercera anterior, es posible al utilizar cómputo en la nube.

Gracias a esta área (cómputo en la nube), el grupo de tecnologías mencionadas anteriormente trabaja de forma precisa. Los sensores monitorean distintos aspectos (suelo, clima, etc.) y los datos recabados son enviados a servidores que se encuentran en la nube (datos digitales). Por lo tanto, algoritmos que se hallan en estos servicios permiten realizar predicciones o recomendaciones (utilizando el gran volumen de datos digitales). Y para consultar estas predicciones es infalible el uso de una aplicación móvil o web.

En términos generales, este sector ofrece un fácil acceso a los datos/aplicaciones desde cualquier lugar y en todo momento, solo basta con un dispositivo con conectividad a internet, lo que permite una colaboración eficaz y una mayor productividad.

De modo que, alojar un Sistema Experto (SE) en la nube sería de gran utilidad para los agricultores e instituciones cercanas a dicho sector. Un SE se denomina como software informático que tiene como finalidad dar solución a un problema de un área en específico, simulando el razonamiento de un especialista para resolver dicha dificultad.

## 1.1 Identificación del problema

El 50 % del rendimiento de un cultivo se le atribuye a factores climáticos y condiciones del suelo. Por consiguiente, si el terreno es sobreexplotado irá perdiendo sus nutrientes y con ello el éxito de las siembras se verán afectadas notoriamente. Por lo tanto, siempre es apropiado aportar enriquecedores externos (fertilizantes).

Complementando que hasta un 85% de las superficies del mundo son deficientes en macro y micronutrientes, factores clave en el crecimiento de los cultivos, estas carencias podrían minimizarse con el uso adecuado de fertilizantes.

Reforzando lo anterior y desde una perspectiva del territorio mexicano, “El hecho de que muchos agricultores del campo mexicano no sean profesionales en ese ramo presenta un enorme obstáculo ya que están aislados de las fuentes de tecnología y se encuentran usando métodos empíricos transmitidos de generación en generación, dando como resultado conocimientos limitados” (Corona, 2016). Si sumamos que el agro mexicano y la industria son consideradas como dos sectores separados. Por consiguiente, el campo ha sido relegado de los avances tecnológicos.

Añadiendo, y tomando en consideración lo antes expuesto, las dosis de fertilizantes pueden ser muy variadas, y la falta de conocimiento de los agricultores de cómo aplicarlos conlleva un gran riesgo, tanto para su cultivo, el medio ambiente y costo de inversión.

INTAGRI (2021) recomienda evitar errores al aplicar sustancias agroquímicas, en la planta su limitante/exceso se traduce en un desarrollo lento, pobre cantidad de granos y malformaciones. En el terreno: variación del pH, degradación en su estructura y microfauna. Contaminación del aire y desequilibrios biológicos en el medio ambiente, sin dejar atrás la toxicidad en aguas subterráneas y superficiales (González, 2019).

En este sentido, el equilibrio es la clave al aplicar fertilizantes, suministrando la porción necesaria y en el momento apropiado, los cultivos se desarrollan de mejor forma, minimizando el impacto de estas sustancias en los suelos, mantos acuíferos y medio ambiente. Reduciendo el calentamiento global y la liberación de gas de efecto invernadero (IAEA, 2020).

Por otro lado, con la reciente invasión de Rusia a Ucrania, distintos países alrededor del mundo han impuesto severas sanciones al territorio ruso. El Ministerio de Industria y Comercio de Rusia informó la primera semana de marzo del año 2022 que podría suspender las exportaciones de fertilizantes por completo.

Siendo Rusia es uno de los principales exportadores de fertilizante a nivel mundial y México, cliente favorito de esta nación, principalmente compra abono nitrogenado.

En concreto, el fertilizante es un insumo básico para la producción agrícola. Mientras más aumenta su precio la producción también. Se prevé que medianos y pequeños agricultores reduzcan un 30 y 50 % las dosis de estos químicos. Por consiguiente, el rendimiento del maíz en México caerá en un 20% para el año en curso debido a esta limitante. Ya que, los precios de los compuestos aumentaron entre un 100% y 180% (Forbes, 2022).

Adicionando, y de acuerdo con las Naciones Unidas (s.f.) desde el año 1950 el crecimiento de la población ha aumentado de forma drástica. Tan solo, de 1950 a 1999 la población pasó de los 2,600 a los 6000 millones de personas. Hasta 2011 la población se incrementó en 1000 millones. Para el año 2050 se calcula que la humanidad alcance los casi 10,000 millones de habitantes. Si estas estadísticas continúan, se vuelve forzoso mejorar la producción agrícola con ayuda de diferentes técnicas y herramientas.

En resumen, si el agricultor no identifica las características de su parcela o el suelo no cumple con cierto estándar de fertilidad, su cultivo no germinará adecuadamente, en consecuencia, tendrá pérdidas monetarias, así como de tiempo y esfuerzo. Agregando, que en la actualidad se requieren de cultivos más eficientes y esto únicamente se alcanzará empleando nuevas tecnologías emergentes (Bayer, 2021). Ya que la fertilidad del suelo es un elemento que se puede maximizar empleando cantidades equilibradas de enriquecedores químicos, acorde al tipo de cultivo, estos pueden ser orgánicos, inorgánicos o químicos.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo general

Desarrollar un sistema experto para la recomendación de un esquema de fertilización en cultivos de maíz (*Zea Mays*), mejorando la eficiencia productiva y reduciendo la cantidad de insumos aplicados, buscando optimizar el impacto ambiental.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Revisar el estado del arte para evaluar los diferentes métodos relacionados con la dosificación de fertilizantes existentes en el mercado y determinar las características deseables para la solución a desarrollar.
- Definir la técnica de inteligencia artificial más conveniente para desarrollar el sistema experto con base en las variables y nutrientes definidos.
- Diseñar el modelo de representación y almacenamiento del conocimiento de acuerdo a la técnica seleccionada para el desarrollo del sistema experto.
- Implementar los mecanismos de recuperación que permitan realizar la búsqueda, emparejamiento y selección de fertilizantes.
- Evaluar el sistema experto mediante métricas de algoritmos de aprendizaje automático.

## 1.3 Justificación

En la actualidad, la agricultura es el suministro de alimentos de todos los países, desde el más desarrollado hasta el menos. Por ende, si la población aumenta considerablemente en los próximos años, la demanda de alimentos será mucho mayor (Baula, 2020).

Según la FAO para el año 2050 la producción agrícola debe incrementar en un 60%, dado que, debido al aumento de la población. En consecuencia, para alcanzar dichas estimaciones únicamente será posible con los nuevos desarrollos tecnológicos. Reforzando y de acuerdo con SIAP (2021) la tecnología aplicada a la agricultura tiene un efecto directo sobre su nivel y comportamiento productivo. De manera que, si analizamos los volúmenes, por ejemplo, del maíz en 1980 se cosecharon 6,766 hectáreas, de las que se obtuvieron 12,374 millones de toneladas. En comparativa para el 2019, se cosecharon 6,690 hectáreas para un total de 27,228 millones de toneladas. Incrementando su rendimiento en un 3.82 %. Este progreso se da en gran medida a la aplicación de diferentes alternativas tecnológicas al proceso productivo.

Sumando que el cambio climático será cada vez más notorio, en áreas geográficas y condiciones ambientales, factores que afectan directamente con el bienestar agrícola (Bayer 2021). Por estas razones, emplear fertilizantes como respaldo y fuente de nutrientes para el suelo será cada vez más necesario considerando lo antes expuesto, complementando que dichos productos mejoran un 20% la rentabilidad y producción de los agricultores.

En México la mayoría de los agricultores no están familiarizados con las nuevas oportunidades que ofrece el sector de las tecnologías de la información (Corona, 2016). En este sentido, el país cuenta con un desarrollo injusto y desigual, los más afectados son los pequeños productores, al realizar esta práctica en condiciones precarias (Paredes, 2021).

Por estas razones, desarrollar un SE que **facilite** seleccionar el tipo y la cantidad apropiada de fertilizante para el cultivo de maíz conducirá a una producción agrícola más eficiente.

Entonces, resulta más factible recurrir a un SE que a contratar los servicios de un especialista en el área, significando para el agricultor numerosos beneficios: disponibilidad del SE (emplearlo en cualquier momento y lugar), misma respuesta y más rápida por parte del SE, tasa de error baja, menos dinero invertido.

También se busca que los intermediarios y beneficiarios de dicha investigación sean asociaciones ganaderas y agrícolas quienes tendrán las capacidades para hacer llegar este tipo de tecnología a los agricultores.

Igualmente, este sistema experto pretende seleccionar fertilizantes que sean amigables con el medio ambiente ya que existen ciertos productos que emiten menos gases de efecto invernadero.

En términos generales, el presente trabajo aportará soluciones a los Programas Nacionales Estratégicos (Pronaces) del CONACYT en particular a la problemática de **“Soberanía Alimentaria”** en concreto contribuir con el bienestar agroalimentario de la población mexicana, considerando lo siguiente:

- Incrementar la eficiencia y productividad alimenticia
- Minimizar el rezago que presentan pequeños y medianos agricultores del territorio mexicano en comparación con las grandes industrias.

## 1.4 Alcances y limitaciones

El proyecto se limitará al diseño de un sistema experto (SE), con el alcance restringido a una versión web. Los resultados ofrecidos por el sistema dependen de la calidad de la información almacenada en la base de datos. La primera versión de este trabajo únicamente abarca el cultivo de maíz, dado que, para el territorio mexicano, representa la base de su alimentación. El SE recomendará únicamente los macronutrientes, que son nitrógeno, fósforo y potasio.

Además, para los experimentos que se realizarán, el sistema estará limitado a la zona de Coacoatzintla. Las reglas a redactar para la dosificación de fertilizante están diseñadas específicamente para este cultivo y región, ya que son complicadas de adaptar a otros productos y zonas.

## 1.5 Pregunta de investigación

¿Con el diseño de un sistema experto basado en reglas para la dosificación y selección de fertilizantes, se tendrá una mayor producción de maíz, a un costo más bajo y evitando tanto

el exceso de fertilizantes, como la falta de nutrientes del suelo en beneficio del medio ambiente?

## **1.6 Hipótesis**

Es posible diseñar un sistema experto que permita a los agricultores veracruzanos seleccionar los fertilizantes y sus respectivas cantidades, que les generen mayores beneficios en cuanto a la producción del grano de maíz a partir de las condiciones del suelo.

## **1.7 Metodología**

Este trabajo tiene como objetivo desarrollar un sistema experto para la dosificación de fertilizantes en el cultivo de maíz. Antes de comenzar con la programación, es necesario revisar y analizar estudios similares. Este análisis se denomina revisión sistemática de la literatura (RSL), siguiendo la metodología propuesta por Kitchenman. La RSL permite identificar, evaluar y sintetizar la información actual sobre sistemas expertos recomendadores de fertilizantes. En la segunda fase, se emplea la metodología de Prototyping, una técnica utilizada en el desarrollo de software e ingeniería para la creación y evaluación de prototipos, que son versiones preliminares o modelos de un sistema o producto final. El objetivo principal de esta metodología es facilitar la comprensión y validación de los requisitos y el diseño antes de la implementación completa. Por lo que, una vez programada la primera versión del SE se realizará un primer experimento en un ambiente controlado, con el fin de recabar datos de importancia, las variables a evaluar para determinar el experimento en campo y continuar con su proceso de mejora.

Finalmente, se efectúan dos experimentos a la par en un ambiente real en el municipio de Coacoatzintla, con la información recabada se evalúan las recomendaciones del prototipo final utilizando métricas de evaluación para algoritmos de inteligencia artificial, así como un diseño de experimentos de análisis de varianza.

### 1.7.1 Proceso de investigación (RSL)

Partiendo del objetivo general y específicos, es fundamental conocer trabajos similares que se han realizado en torno a la dosificación de fertilizantes, asimismo, indagar cómo han abordado dichas problemáticas.

Para analizar y revisar el estado del arte relacionado con el tema de interés, se realizará una revisión sistemática de la literatura (RSL) siguiendo la metodología de Charters & Kitchenham (2007). La cual consta de tres etapas: planificación, realización y escritura. En términos generales el enfoque busca definir las preguntas de investigación, conformar la cadena de búsqueda (palabras clave, sinónimos de las palabras clave), identificar estudios primarios, aplicando criterios de inclusión y exclusión, es decir, establecer un procedimiento de selección para obtener los artículos más relevantes.

Después de ubicar el material secundario se procede a examinar y extraer información relevante, con la finalidad de redactar el informe de investigación.

Para analizar y revisar el estado del arte relacionado con el tema de interés, se llevará a cabo una revisión sistemática de la literatura (RSL) siguiendo la metodología de Charters & Kitchenham (2007). La cual consta de tres etapas: planificación, realización y escritura.

En términos generales el enfoque busca definir las preguntas de investigación, conformar la cadena de búsqueda (palabras clave y sinónimos de las palabras clave), identificar estudios primarios; al imponer criterios de inclusión y exclusión, además. Después de ubicar el material secundario se procede a examinar y extraer información relevante, con la finalidad de redactar el informe de investigación.

En primer lugar, se definieron 4 preguntas principales y de ellas se desprendieron 20 sub-preguntas para recuperar estadísticos e información destacada de los diferentes artículos elegidos.

Pregunta	Subpreguntas
¿Cómo modela el sistema experto la base del conocimiento?	<ol style="list-style-type: none"><li>1. ¿A qué área es aplicado el SE?</li><li>2. ¿Cuál es la finalidad del SE?</li><li>3. ¿A quién va dirigido?</li></ol>

	<ol style="list-style-type: none"> <li>4. ¿De qué forma se adquiere la base del conocimiento?</li> <li>5. ¿Cómo se almacena la base del conocimiento?</li> <li>6. ¿Existe un preprocesamiento de la información?</li> </ol>
<b>¿Con qué métodos y técnicas se implementa el sistema experto?</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ¿Qué métodos y técnicas se aborda el sistema experto?</li> <li>2. ¿Cómo se valida la base del conocimiento seleccionada?</li> <li>3. ¿Cómo emite la solución el sistema experto?</li> </ol>
<b>¿Cómo se valida la propuesta?</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ¿Cuál es el tamaño de la muestra utilizada?</li> <li>2. ¿Con qué tecnologías fue desarrollado?</li> <li>3. ¿Qué aspectos evalúa el sistema experto?</li> <li>4. ¿Qué parámetros tomo en cuenta el sistema experto para emitir la recomendación o sugerencia?</li> <li>5. ¿Qué tipo de prueba o experimento se realiza?</li> <li>6. ¿Dónde fue evaluado?</li> <li>7. ¿Qué resultados se obtuvieron?</li> <li>8. ¿Qué temas abiertos se identifican?</li> </ol>
<b>¿Qué aporta el estudio a mi trabajo?</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ¿Qué hicieron los autores?</li> <li>2. ¿Qué aspecto puede resolver en mi trabajo?</li> <li>3. ¿Cómo podría serme de utilidad?</li> </ol>

Tabla 3 Preguntas y sub-preguntas de investigación

Una vez establecidas las preguntas de investigación se tomaron 4 bases de datos para buscar y seleccionar los artículos: ACM, IEEE, SpringerLink y Google Academic.

Considerando los siguientes términos con sus respectivos sinónimos (Tabla 4):

<b>Términos</b>	<b>Sinónimos</b>
“expert system”	artificial intelligence technique, recommender

“dosing unit”	Handler
“fertilizer”	Compost
precision agriculture	

Tabla 4 Términos de búsqueda y sinónimos

Tomando en cuenta la cadena de búsqueda (Tabla 5) se permutó quitando palabras clave, los resultados se observan en la Tabla 6, aplicando los criterios de inclusión y exclusión para la obtención del material primario (Tabla 7).

<b>Cadena base de búsqueda</b>	(Expert system OR artificial intelligence technique OR recommender) AND (handler OR dosing unit) AND (fertilizer OR compost) AND precision agriculture
--------------------------------	--

Tabla 5 Cadena base de búsqueda

<b>BD</b>	<b>Cadena de búsqueda</b>	<b>Total</b>
Google A.	(Expert system OR artificial intelligence technique) AND (handler OR dosing unit) AND (fertilizer OR compost) AND precision agriculture	224
Google A.	(Expert system OR artificial intelligence technique OR recommender) AND (handler OR dosing unit) AND (fertilizer OR compost) AND precision agriculture	<b>101</b>
Google A.	(Expert system OR artificial intelligence technique) AND (dosing unit) AND (fertilizer OR compost) AND precision agriculture	4,420
SpringerLink	(Expert system OR artificial intelligence technique OR recommender) AND (handler OR dosing unit) AND (fertilizer OR compost) AND precision agriculture	<b>35</b>
SpringerLink	(Expert system OR artificial intelligence technique) AND (handler OR dosing unit) AND (fertilizer OR compost) AND precision agriculture	216

SpringerLink	(Expert system OR artificial intelligence technique) AND (dosing unit) AND (fertilizer OR compost) AND precision agriculture	515
ACM	(Expert system OR artificial intelligence technique OR recommender) AND (handler OR dosing unit) AND (fertilizer OR compost) AND precision agriculture	<b>187</b>
ACM	(Expert system OR artificial intelligence technique) AND (handler OR dosing unit) AND (fertilizer OR compost) AND precision agriculture	218
ACM	expert system AND dosing unit AND fertilizer AND precision agriculture	147
IEEE	(Expert system OR artificial intelligence technique OR recommender) AND (handler OR dosing unit) AND (fertilizer OR compost) AND precision agriculture	<b>514</b>
IEEE	(Expert system OR artificial intelligence technique) AND (handler OR dosing unit) AND (fertilizer OR compost) AND precision agriculture	560
IEEE	(Expert system OR artificial intelligence technique) AND (dosing unit) AND (fertilizer OR compost) AND precision agriculture	463

Tabla 6 Resultados probando las diferentes cadenas de búsqueda

<b>Criterios de inclusión/exclusión</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Documentos del 2017 a la fecha.</li> <li>● Documentos encaminados a las ciencias de la computación y al sector agrícola.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Trabajos escritos en el idioma inglés.</li> <li>● Clasificados como artículos, <i>proceedings</i></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Por relevancia.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Documentos con palabras clave en el título o resumen.</li> </ul>

Tabla 7 Criterios de inclusión y exclusión

Finalmente, y después de obtener los artículos primarios se procedió a revisarlos parcialmente leyendo el resumen de cada uno (2da clasificación). La Tabla 8 muestra los artículos seleccionados para escribir un informe de revisión (3ra clasificación).

Base de datos	Número artículos 1ra clasificación	Artículos relevantes 2da clasificación	Artículos relevantes 3ra clasificación
ACM	187	12	3
IEEE	514	47	15
Springer Link	35	4	0
Google Academic	101	6	0
Otros			7
<b>Total</b>			<b>24</b>

Tabla 8 Clasificación artículos

### 1.7.2 Proceso de mejora

El proceso de mejora se realiza después de obtener los datos del primer experimento, con el fin de mejorar la operatividad del sistema. Garantizando un software que recomiende el fertilizante en función de las necesidades del suelo y las cantidades recomendadas para la región de estudio con base a las recomendaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias.

### 1.8 Riesgos y consideraciones éticas

Como se trata de un proyecto que involucra recolección de datos con entidades públicas o privadas. Mantener a salvo la información que proporcionen siempre será uno de los pilares de esta investigación.

Aun sabiendo que los datos a emplear no son de carácter personal, la presente investigación cumplirá con cualquier acción que conserve en total confidencialidad el uso de estos. Si por alguna razón es indispensable información particular, el sitio web incluirá un aviso de privacidad, a través del mismo se le informará al usuario la existencia y el tratamiento que recibirán sus datos personales.

El aviso de privacidad incorporará los siguientes apartados (INAI, 2015):

- Identidad del responsable
- Qué datos se recolectan
- Cuáles son las finalidades del tratamiento
- Los derechos a los que goza el titular
- Si se comparten los datos con otras entidades

## Capítulo 2: Marco teórico y de referencia

### 2.1 El maíz y su desarrollo

#### 2.1.1 Importancia del maíz

El maíz tuvo su origen hace más de 10 mil años a. C. en Oaxaca, México. Iniciando su expansión desde este territorio al resto del continente americano, por consiguiente, fue adquiriendo diversos nombres: choclo, corn, milho, donde los nahuas lo conocían como Centli (ASERCA, 2018). Su nombre científico es *Zea mays*.

Tan solo en México existen 64 de las más de 200 razas existentes en América Latina, estas 64 variedades son endémicas del país. Para el mexicano, este cultivo representa su cultura e identidad ante el resto del mundo (SIAP, 2018).

Además, este cereal dio paso a que los grupos nómadas se volvieran sedentarios, ya que, la planta requiere de atenciones humanas para impulsar su crecimiento, a la vez, era primordial en la alimentación de estos pueblos, sino que algunos lo empleaban en ámbitos ceremoniales-religiosos como es el caso de la cultura mexicana. Con la llegada de Cristóbal Colón a América en 1492 da origen a su internacionalización, distribuyéndose en Europa, África, Asia y Oceanía. Adquiriendo una gran popularidad por su costo-beneficio (infosiap, s.f.).

Considerando su aporte nutrimental, el maíz es rico en vitaminas A, B, C y E, y en minerales, abarcando fósforo, hierro, zinc, cobre y magnesio. Aportando antioxidantes como la zeaxantina y la luteína, las cuales representan un papel sustancial en la salud de los ojos (zeaxantina), mientras que la segunda nos protege de los rayos del sol. Igualmente, beneficia la digestión por su contribución en fibra para ser exactos 3.8g por cada 100g de *Zea mays*. Adicionalmente, aporta ácido fólico (26mgc/100g), idóneo para mujeres embarazadas (Alimente, 2020; Yakult, 2020).

<b>Valores nutricionales del <i>Zea mays</i> (100 g)</b>
Calorías: 95 kcal
Carbohidratos: 18.3
Grasas: 0.8g
Proteínas: 3.2g
Fibra: 3.8g

*Tabla 9 Aporte nutrimental del maíz por cada 100g. Fuente: Alimento, 2020.*

Dentro del ámbito culinario, la tortilla es una de las fuentes más representativas de este producto y en especial de la cocina mexicana, siendo la base de los tacos. Hasta 2018 México tenía un gasto de 75 kg per cápita, es decir, se consumían de 7 a 10 tortillas diarias por persona (GRUMA, 2018). De igual forma, el maíz está presente en miles de platillos como tamales, quesadillas, pasteles, pan, enchiladas, totopos, atole, entre otros.

En el sector económico, la producción de dicho cereal genera cientos de empleos. Considerando la colecta de 2021/2022, EUA es el mayor fabricante, seguido de China, Brasil, Unión Europea, Argentina, Ucrania, India y México, este último cosechó alrededor de 27,600,000 t (Produccion Agricola Mundial, 2022). A nivel estatal Sinaloa ocupa el primer lugar (5,780,568 t), mientras tanto, Veracruz se ubica en el 5º escalón con 484,599 t (SIAP, 2020). En términos generales, la importancia del maíz va desde lo social, económico, político, religioso y cultural. Siendo la base de alimentación de millones de personas.

### 2.1.2 Etapa vegetativa y reproductiva

El desarrollo fenológico del maíz se divide en dos etapas, vegetativa y reproductiva. La primera comprende a grandes rasgos la emergencia de la planta, aparición de las hojas y espigas. En cambio, la segunda abarca la formación, crecimiento, maduración del grano y mazorca (Zaragoza & Fertilab, 2019).

Gracias a esta clasificación, se pueden detectar y prevenir de mejor forma cualquier plaga que atente con el desarrollo y crecimiento del maíz (Intagri, s.f.). La ilustración 1 muestra de manera gráfica estas dos fases. La tabla 10 señala en términos generales la etapa fenológica y su característica principal que la distingue, así como el número de días después de la siembra que le cuesta llegar a dicha fase y su altura alcanzada.

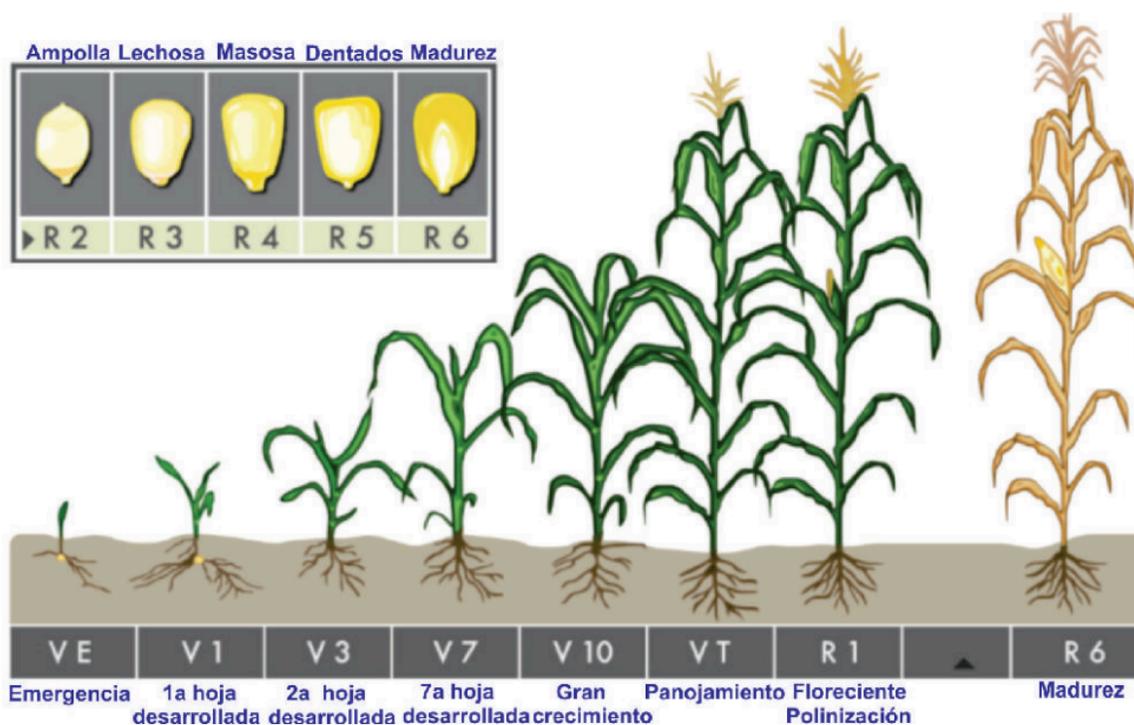


Ilustración 1 Fase vegetativa y reproductiva del maíz. Fuente: ANDES, s.f.

Desarrollo vegetativo y reproductivo del maíz crecidos en el Bajío de México en 2017			
Etapa fenológica	Característica principal	DDS (Días después de la siembra)	Altura aproximada
VE	Emergencia de la planta	5	0
V1	Aparición de la primera hoja	13	6
V2	Aparición de la segunda hoja	16	13
V3	Aparición de la tercera hoja	20	22

V4	Aparición de la cuarta hoja	23	28
V5	Aparición de la quinta hoja	26	38
V6	Aparición de la sexta hoja	30	53
V7	Aparición de la séptima hoja	33	73
V8	Aparición de la octava hoja	37	99
V9	Aparición de la novena hoja	40	123
V10	Aparición de la décima hoja	43	151
V11	Aparición de la décimo primera hoja	47	165
V12	Aparición de la décimo segunda hoja	50	200
V13	Aparición de la décimo tercera hoja	53	226
V14	Aparición de la décimo cuarta hoja	57	245
V15	Aparición de la décimo quinta hoja	60	255
V16	Aparición de la décimo sexta hoja	64	268
V17	Aparición de la décimo séptima hoja	67	272
V18	Aparición de la décimo octava hoja	70	275
V19	Aparición de la décimo novena hoja	72	277

VT	Espiga completamente emergida	74	279
R1	Aparición de los estigmas	75	284
R2	Grano en forma de ampolla	84	292
R3	Grano lechoso	94	292
R4	Grano masoso	106	292
R5	Grano dentado	123	292
R6	Grano maduro	151	292
Cosecha	Cosecha del producto	174	292

Tabla 10 Etapa fenológica, característica principal, número de días después de la siembra, altura de la planta. Fuente: Zaragoza y Fertilab (2019).

### 2.1.3 Nutrientes

El *Zea mays* puede cultivarse prácticamente en cualquier zona geográfica, pero hay que tener en cuenta ciertas consideraciones:

**Climáticas:** Según autores citados por Zaragoza & Fertilab (2019), el clima idóneo para el desarrollo y crecimiento del maíz va desde los 9.5 – 30.8 °C.

**Precipitaciones pluviales – riego:** El maíz requiere de 500 a 800 milímetros (mm) de agua a lo largo del ciclo de cultivo. Si existe un déficit de esta sustancia en la etapa de floración existirá una repercusión en el rendimiento de los granos, traduciéndose elotes vanos o incompletos (FAO, s.f.).

**Suelo:** El *Zea mays* puede crecer casi en cualquier tipo de suelo, en especial en aquellos drenados con un pH de 6 a 7. Evitando suelos susceptibles a encharcamientos (FAO, s.f.; CONACYT, s.f.).

**Nutrientes:** Acorde con YARA (2022), Zaragoza y Fertilab (2019) el maíz requiere de 11 nutrientes para crecer y lograr el mejor rendimiento:

- Macronutrientes: nitrógeno, fósforo y potasio los cuales deben presentarse en mayor cantidad.

- Macronutrientes secundarios necesarios en cantidades altas pero menores que los macronutrientes: azufre, calcio y magnesio.
- Micronutrientes necesarios en bajas proporciones: boro, cobre, hierro, manganeso, zinc.

En seguida se mencionan los beneficios y repercusiones de cada nutriente para el cultivo de maíz.

- **Nitrógeno (N):** mejora el proceso de fotosíntesis, ayuda a producir mayor cantidad de biomasa y aporta vitaminas. Su déficit reduce el crecimiento de la planta, mazorca, disminuye el peso del grano, fácil identificarlo en las hojas maduras, dado que muestran un color verde pálido. A partir de V6 la hortaliza absorbe más porcentaje de N y en comparación con los demás nutrientes este se requiere en superior proporción (INTA, 2015; Zaragoza & Fertilab, 2019).
- **Fósforo (P):** se requiere en menor cantidad de N y hasta V6 la absorción es baja. Impacta en el crecimiento de la mazorca-grano, aumenta la productividad y adelanta la fecha de cosecha. Su deficiencia limita el desarrollo del elote y del grano, retrasa la madurez del cultivo, en etapas adultas las hojas tienden a tornarse de un color morado (YARA, 2022; Zaragoza & Fertilab, 2019).
- **Potasio (K):** la aplicación de K con respecto al maíz es baja, ya que, este regresa vía residuo de sí mismo. Su presencia incrementa el sistema de defensas, se traduce en un follaje sano, mejora el crecimiento de las raíces. Una deficiencia severa puede identificarse en tallos delgados, hojas color verde pálido y demora en el progreso del cereal (YARA, 2022; Zaragoza & Fertilab, 2019).
- **Magnesio (Mg):** nutriente de suma importancia para el sistema de biosíntesis de la clorofila, fotosíntesis. En etapas tempranas del ciclo de cultivo beneficia el rendimiento y desarrollo de la planta. Su limitación es notoria en hojas inferiores o intermedias al presentar una coloración verde pálido, las hojas adultas tienden a doblarse (YARA, 2022; Zaragoza & Fertilab, 2019).
- **Calcio (Ca):** permite un follaje sano, aumentando el rendimiento y mejorando la calidad del cereal. La falta de Ca es identificada en etapas jóvenes: hojas retorcidas, donde las primeras tardan en aparecer y las puntas de estas sufren curvaturas (YARA, 2022; Zaragoza & Fertilab, 2019)

- **Azufre (S):** facilita un follaje verde y sano, su presencia mejora el uso de N. Su déficit puede confundirse con la falta de nitrógeno. Por lo general, las hojas se aprecian de un color amarillento a blanquecinas, mientras que, las basales adquieren una tonalidad verde pálido, facilitando el nulo crecimiento de la planta.
- **Boro (B):** más de la tercera parte de los suelos mexicanos presentan déficit de boro. El B beneficia la regulación de auxinas, transporte de carbohidratos, polinización, expansión de las raíces, contribuyendo en el desarrollo y crecimiento de la planta, así como de la mazorca. Su recorte genera malformaciones en las hojas jóvenes y reduce el crecimiento del grano. Aplicarlo en grandes proporciones causa toxicidad al cultivo (Zaragoza & Fertilab, 2019).
- **Cobre (Cu):** Beneficia el desarrollo de la mazorca, aumenta el rendimiento del cultivo y adelanta la fecha de cosecha. Su limitante se identifica en hojas jóvenes presentando un verde descolorido-amarillento afectando el crecimiento de la planta, al igual que el B su aplicación en exceso genera toxicidad (YARA, 2022; Zaragoza & Fertilab, 2019).
- **Hierro (Fe):** su presencia repercute en un follaje sano y verde, de igual forma, aumenta la utilidad y calidad del grano. Una deficiencia genera un color blanquecino en toda la hoja (hojas jóvenes) y un tono amarillento en las hojas maduras (YARA, 2022; Zaragoza & Fertilab, 2019).
- **Manganeso (Mn):** optimiza la síntesis de la clorofila, asimilación de nitratos, absorción y transporte de N, P, Ca y Mg, además, impacta de buena forma en la madurez fisiológica del grano. Ante deficiencias severas se pueden observar franjas blancas y alargadas en hojas jóvenes (Zaragoza & Fertilab, 2019).
- **Zinc (Zn):** micronutriente con menor presencia en los suelos del mundo. Zn ayuda a la formación de almidones, síntesis de proteínas, optimiza la maduración y producción de semillas. Su limitante alarga el periodo de crecimiento, las hojas en etapa de desarrollo se tornan amarillentas a blanquecinas y disminuye el aprovechamiento de N y P (Zaragoza & Fertilab, 2019).

## 2.2 Fertilizantes

Como se apreció, el suelo dispone de algunos nutrientes provenientes de los microorganismos, sin embargo, en la mayoría de los casos se encuentran en rangos limitados. Por lo tanto, el objetivo de la fertilización química es mejorar las condiciones del suelo y a su vez proveer de los nutrientes escasos.

Con el auge de la población, la demanda de alimentos ha venido al alza, por ende, el uso adecuado de sustancias enriquecedoras para las plantas es de suma relevancia. Como se señaló en secciones pasadas, la presencia y ausencia de cada nutriente es muy notoria en la calidad del producto, los más importantes son el nitrógeno, fósforo y potasio, dado que, diversos estudios han comprobado su eficacia en el bienestar de las tierras y cultivos (SIAP, 2021).

Dando paso a que los fertilizantes se dividen en 3 tipos, principalmente:

- **Orgánicos:** mejor conocidos como abonos y son de origen animal o vegetal. La principal ventaja es que minimiza su impacto al suelo, en cambio, la planta tarda más en absorberlo, siendo su deficiencia más notable (Valverde, 2021).
- **Químicos:** se debe aplicar de forma equilibrada, en exceso deteriora las condiciones del terreno, planta, aguas superficiales y subterráneas. Su presencia se nota a corto plazo, mejorando las defensas, aspecto y calidad del cultivo (Valverde, 2021).
- **Biofertilizantes:** al igual que los orgánicos, son respetuosos con el medio ambiente. Muy utilizados en la agricultura ecológica y principalmente elaborados a base de microorganismos (PROFECO, 2021).

Y dependiendo de su método de aplicación, estos se clasifican en (Valverde, 2021):

- **Fertilizante foliar:** sustancia diluida en agua y aplicada en la parte aérea de la planta. Es una gran alternativa y complemento de los fertilizantes suministrados vía suelo.
- **Fertilizante radicular:** aplicados directamente en la base de la planta, ya sea diluidos en agua o de forma directa. La planta los absorbe de forma inmediata al estar cerca de las raíces.

- Fertirrigación: sustancias diluidas en agua y esparcidas con máquinas por todo el terreno cultivado. Lo anterior permite ahorrar tiempo y esfuerzo al momento de su aplicación.

De las sustancias antes citadas, los fertilizantes químicos son los más empleados por los agricultores, debido a su pronta reacción en los plantíos y su bajo costo de adquisición. Estos se dividen en simples, compuestos, subdivididos en binarios o ternarios (Matadamas, 2021).

- Simples: contienen un solo elemento, por ejemplo: nitrógeno, fósforo o bien potasio.
- Compuestos: constituidos por dos o tres nutrientes.
  - Binario: incorpora la siguiente relación: NP, NK o PK.
  - Terciario: incluye todos los macroelementos NPK, entre los que destacan, según su fórmula: 15-15-15, 16-16-16, 17-17-17 y otros.

Como es de esperarse los fertilizantes son sustancias compuestas y asimilables para los cultivos. Las empresas fabrican este tipo de sustancias con determinados porcentajes de concentración (Matadamas, 2021). Dentro del mercado, existe una infinidad de concentraciones y ni se diga de marcas, la Tabla 11 muestra las más comunes.

Nombre comercial	Fórmula	Concentración (%)			Otros elementos
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	
<b>Urea</b>	CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	46	0	0	
<b>Triple 17</b>		17	17	17	
<b>DAP</b>	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	18	46	0	
<b>Nutri Wunder</b>		20	27	25	Mg, S, Fe, Cu, Mn, Zn
<b>Nitrato de potasio</b>	KNO <sub>3</sub>	13		46	

Tabla 11 Fertilizantes comúnmente empleados en la región de Coacoatzintla.

**Urea:** es el fertilizante más popular por su concentración de N. De gran utilidad para todas las plantas, su aplicación puede darse de varias formas, su mejor eficiencia se alcanza aplicándolo directamente al suelo. Suministrar antes o durante la siembra (YPF, 2018).

**Triple 17:** sustancia sumamente equilibrada, empleado para mejorar la producción y crecimiento. Utilizado en cultivos como el maíz, trigo, garbanzo y frijol (Grupo Impulsora, 2021).

**DAP:** producto que debe ser aplicado al suelo y cerca del cultivo. Aporta nitrógeno y fosforo, en relación de 1:3. Muy empleado en cultivos de granos.

**Nutri wunder:** sustancia de aplicación vía foliar, puede usarse en cualquier etapa vegetativa. Facilita el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

### 2.2.1 Fases de fertilización

Luego de realizar un análisis de suelo, Zaragoza & Fertilab (2019) sugieren aplicar 3 etapas de fertilización, como se muestra en la Tabla 12. La primera debe aplicarse antes o durante la siembra, la segunda en la etapa V4, cuando se realiza el primer o segundo riego de auxilio, la tercera se recomienda administrar en cuanto se realice un nuevo estudio de suelo,

con la finalidad de comprobar la disposición o deficiencia de los nutrientes, máximo en las fases V6 o V7.

<b>Fases de fertilización en el cultivo de maíz</b>			
1ª Fase	Macronutrientes	<b>Nutriente</b>	<b>Cantidad - %</b>
		Nitrógeno	20
		Potasio	50
		Fósforo	100
	Calcio, Magnesio, Azufre	% en función del análisis de suelo	
	Micronutrientes	Fierro, Zinc, Boro, Cobre, Manganeso, Molibdeno	% en función del análisis de suelo
2ª Fase	Macronutrientes (V4)	Nitrógeno	80
		Potasio	50
		Fósforo	0
3ª Fase	Macronutrientes (Aplicar durante V6 o V7)		% en función del análisis de suelo
	Micronutrientes (Aplicar durante V6 o V7)		% en función del análisis de suelo

*Tabla 12 Fases de fertilización en el cultivo de maíz. Fuente Zaragoza & Fertilab (2019).*

Contemplando la importancia del maíz, los cuidados y atenciones que exige. Resulta indispensable recurrir a las nuevas tecnologías e innovaciones para incrementar su rendimiento y, por lo tanto, satisfacer su demanda.

Desde hace unos años y más con el auge del desarrollo tecnológico, la AP busca optimizar la producción, mejorar la toma de decisiones, reducir los insumos aplicados, por mencionar algunos. En breve se narra la definición de AP, elementos que la conforman y sus aplicaciones.

## 2.3 Agricultura de precisión (AP)

### 2.3.1 Definición

Considerando que diversas actividades relativas al ciclo de cultivo pueden optimizarse aprovechando múltiples tecnologías. Desde hace tiempo existe una estrategia con el objetivo de impulsar estos procesos, denominada agricultura de precisión.

Teniendo en cuenta la definición de la International Society of Precision Agriculture (2019) sobre la AP: “La Agricultura de Precisión es una estrategia de gestión que recoge, procesa y analiza datos temporales, espaciales e individuales y los combina con otras informaciones para respaldar las decisiones de manejo de acuerdo con la variabilidad estimada, y así mejorar la eficiencia en el uso de recursos, la productividad, la calidad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la producción agrícola”.

Esta disciplina se compone de tres etapas (INCYTU, 2018):

- **Recolección de datos:** se emplean diferentes dispositivos (sensores) para monitorear las condiciones del suelo y del medio ambiente.
- **Análisis de datos:** información analizada por expertos en el área o por sistemas informáticos, con la finalidad de proporcionar sugerencias o recomendaciones.
- **Implementación:** finalmente, el productor cultiva en función de las recomendaciones o sugerencias.

Algunas de las ventajas que aporta la AP son:

- El agricultor elige las tecnologías según sus necesidades y su capacidad de inversión.
- Mejorar la eficiencia en el uso de los recursos (fertilizantes, pesticidas, plaguicidas, agua).
- Monitoreo de datos en tiempo real.
- Aumentar el rendimiento y productividad de los cultivos.

## 2.3.2 Elementos de la AP

Sin duda, con el avance tecnológico y considerando la definición proporcionada por ISPA, la AP es extremadamente indispensable en el sector agrícola debido a las ventajas que ofrece. A continuación, se muestran los principales elementos de la AP:

- **Sistema de información geográfica:** programas que emplean hardware y software para recuperar, almacenar, gestionar y analizar datos espaciales y geográficos (Bhatnagar, 2019).
- **Sistemas de posicionamiento global:** permiten establecer la posición en coordenadas de latitud y longitud en cualquier lugar del planeta Tierra. Dan seguimiento a vehículos, aviones, barcos, entre otros (Bhatnagar, 2019).
- **Redes de sensores inalámbricas:** red de nodos esparcidos y organizados en una localización en específico. Empleados para recabar datos del suelo, clima o bien utilizados en sistemas de riego automatizados (Bhatnagar, 2019).
- **Procesamiento de imágenes:** imprescindible para mejorar, analizar o extraer datos de una imagen. Permiten identificar enfermedades o falta de fertilizante en el sector agrícola, etcétera.
- **Software informático:** analizan enormes cantidades de datos provenientes de los demás componentes, en particular son implementados para mejorar la toma de decisiones, visualización de gráficas, mapas, etcétera. Estos softwares deben ser de fácil uso, en gran medida por el tipo de usuario al que va destinado (McBratney & Whelan, 2001).

### 2.3.2.1 Aplicaciones

Tomando como referencia el apartado 2.2, la AP puede ser aplicada en distintos sectores de la agricultura (JRC of the European Commission & MARS, 2014; Berger 2019):

1. Facilitar el intercambio de información entre agricultores, contratistas, proveedores, empresas y gobierno.
2. Desarrollo de software para análisis de datos con la finalidad de mejorar la toma de decisiones.
3. Optimización de procesos:

- a. fertilización
  - b. riego
  - c. pesticidas
  - d. siembra
  - e. monitoreo de plagas
  - f. diagnósticos de enfermedades
  - g. seguimiento del crecimiento de la planta
4. Análisis del suelo y clima en tiempo real.

Como se señaló, la AP se apoya de diferentes tecnologías para optimizar cada uno de sus procesos. Dentro de estas podemos localizar a los softwares informáticos, que a grandes rasgos permiten analizar un gran volumen de datos para mejorar la toma de decisiones. En seguida se abordan los sistemas expertos, su definición, elementos que lo conforman, tipos y sus aplicaciones.

## 2.4 Sistemas Expertos (SE)

### 2.4.1 Definición

Los sistemas expertos pertenecen a una subrama de la inteligencia artificial, su inclusión en los diferentes campos ha permitido sistematizar el conocimiento y razonamiento de un versado. El principal objetivo de un SE es imitar el raciocinio de un experto humano para proporcionar respuestas/sugerencias/recomendaciones de un área en particular (Becerra et al, 2019). Por su parte Nagori (2014) resalta que un SE explota conocimientos especializados para resolver problemas de la misma forma que lo hace un estudioso.

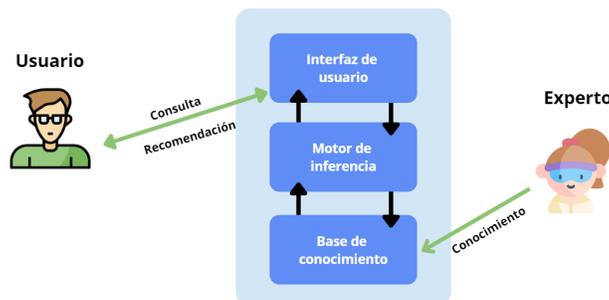
### 2.4.2 Elementos que lo conforman

Un SE está conformado de cinco elementos esenciales:

- **Base de conocimiento (BC):** contiene el conocimiento necesario para comprender, formular y resolver problemas.
- **Motor de inferencia:** es el componente esencial de un SE, es el cerebro del mismo, encargado de ejecutar las reglas una a una, partiendo de un encadenamiento hacia

adelante o atrás. Esencialmente son líneas de código que vamos a programar de manera estructurada y ejecutadas según la BC.

- **Interfaz de usuario:** intermediario entre el SE, usuario no experto y experto.
- **Experto humano:** son las personas versadas en el tema, quienes proporcionan la BC.
- **Usuario no experto:** es el encargado de emplear el SE para consultar sugerencias sobre un tema en particular.



*Ilustración 2 Componentes de un SE. Elaboración propia.*

En función de lo mencionado (SE) enseguida se presentan los diferentes tipos de sistemas expertos (cinco para ser más preciso), abarcando sus principales distintivos.

### 2.4.3 Tipos de SE

Nagori (2014) resalta que existen cinco tipos de SE:

1. **SE basado en reglas:** compuesto por un conjunto de reglas gramaticales. Las reglas siguen la estructura IF-THEN, IF representa los hechos o premisas y THEN el consecuente. Donde cada regla simboliza una pieza de conocimiento. En la sección 2.4 se aborda en mayor profundidad este tipo de SE.
2. **SE difuso:** permite representar conocimiento vago, en concreto cuando se emplean términos como “bajo”, “medio bajo”, “medio”, etc. Estos programas fusionan las reglas, que al igual siguen la estructura IF-THEN. Para construir un semejante se debe seguir el siguiente proceso: determinar las variables lingüísticas, determinar

los conjuntos difusos, obtener y construir las reglas difusas, codificar el procedimiento para realizar la inferencia y finalmente evaluar el SE.

3. **SE basado en marcos:** a diferencia de los SE basados en reglas y difusos, este tipo de SE emplea los marcos para representar el conocimiento. Un marco comprende información sobre un concepto en particular. En cambio, los demonios emplean la estructura IF-THEN, ejecutándose cuando la parte del IF cambia de valor.
4. **SE neuronal:** combina reglas y redes neuronales. En cambio, la base de conocimiento del SE basado en reglas se sustituye por una base de conocimiento neuronal. La combinación de reglas y neuronas permite al SE explicar sus conclusiones.
5. **SE neuro-fuzzy:** combina la lógica difusa al emplear redes neuronales, por consiguiente, se vuelve un SE que puede aprender por sí mismo. La estructura de un SE neuro-fuzzy consta de capas de salida, entrada y ocultas (donde se realiza el proceso de inferencia).

La siguiente tabla ilustra sus principales ventajas y desventajas:

Técnica	Ventajas	Desventajas
SE basado en reglas	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Proporciona resultados coherentes</li> <li>● La tasa de error disminuye en función de las reglas definidas</li> <li>● Facilidad de adaptación a nuevas condiciones</li> <li>● Fácil de entender.</li> <li>● Fáciles de construir</li> <li>● Empleados para representar el conocimiento de un experto humano.</li> <li>● La base de conocimiento está separada del</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Proporciona respuestas cortas</li> <li>● No es conveniente cuando se emplean grandes cantidades de reglas.</li> <li>● La estructura de la base de conocimiento es muy importante para minimizar los errores.</li> <li>● Funcionan para situaciones en específico.</li> <li>● No es dinámico y flexible.</li> </ul>

	<p>procesamiento de reglas, permitiendo añadir nuevas reglas.</p>	
SE difuso	<ul style="list-style-type: none"> <li>● No requiere datos precisos.</li> <li>● Imitan el conocimiento de un experto humano.</li> <li>● Fáciles de implementar.</li> <li>● Fáciles de entender.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● La lógica difusa no siempre es exacta</li> <li>● Dependen altamente del conocimiento humano.</li> <li>● No son muy empleados ya que emplean datos inexactos.</li> <li>● La actualización del conocimiento no es una tarea fácil</li> <li>● No es dinámico y flexible.</li> </ul>
SE basado en marcos	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Emplea marcos para representar el conocimiento.</li> <li>● Para ejecutar las reglas se busca el marco apropiado que contenga las requeridas</li> <li>● Facilita el mantenimiento del sistema.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● No puede aprender y mucho menos adaptarse a nuevos cambios</li> <li>● Dificultad para manejar la tolerancia a la incertidumbre.</li> </ul>
SE neuronal	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Acepta conjunto de datos incompletos</li> <li>● Flexible a entornos cambiantes</li> <li>● Aprende rápidamente y se adapta a nuevos conjuntos de datos</li> <li>● No requiere de un experto humano</li> <li>● Proporciona buen tiempo de procesamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● La facilidad de explicación es complicada</li> <li>● Conjuntos de datos incorrectos conducen a riesgos de precisión.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Al tiempo de aprendizaje crece en función de los datos</li> </ul>	
SE neuro fuzzy	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Combina la técnica de lógica difusa con redes neuronales</li> <li>● Facilidad de aprendizaje.</li> <li>● El tiempo de aprendizaje es razonable.</li> <li>● Proporciona buena facilidad de explicación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● El componente difuso dificulta su mantenibilidad.</li> </ul>

Tabla 13 Ventajas y desventajas de los diferentes sistemas expertos.

Claramente algunos sistemas expertos son fáciles de construir, pero a su vez presentan dificultades para darles mantenimiento. La estructura para representar el conocimiento es mediante reglas IF-ELSE. Dado el número de variables que contempla este proyecto (pH, NPK y CE) resulta factible implementar un sistema experto basado en reglas, ya que, el conocimiento plasmando en la base de conocimiento es totalmente adquirido a través de la literatura y la experiencia de un ingeniero agrónomo. Agregando que el número de reglas no superará las 100, facilitando su actualización en cualquier momento, el caso de estudio está definido para una zona en particular (municipio de Coacoatzintla) y su tiempo de respuesta es mínimo considerando el número de reglas.

Considerar otras técnicas resulta poco favorable, el SE difuso exhibe dificultades en la precisión de sus respuestas, mientras que el SE neuronal, trabaja bien y se adapta a nuevos cambios, pero por el número de variables que se contemplan resulta conveniente definir la base de conocimiento con un SE basado en reglas.

#### 2.4.4 Aplicaciones

Considerando los diferentes tipos de SE, estos pueden ser aplicados prácticamente en cualquier área:

- Salud
- Agricultura
- Economía
- Educación
- Ciencias de la computación, etc.

Luego de analizar la diversidad de SE y en virtud de los resultados del análisis del estado del arte (Sección 2.5). Los SE basados en reglas resultan ser de los programas informáticos más convenientes para mejorar la toma de decisiones a lo largo del ciclo de cultivo, además muestran buena precisión en sus recomendaciones. Son desarrollados para beneficiar a los agricultores, dado que se pueden utilizar en cualquier lugar y momento, considerando que su costo de adquisición es bajo al compararlo con el servicio de un especialista. Para continuar se relata la estructura de los SE, sus tipos, estos últimos determinados por el tipo de inferencia que adoptan.

## 2.4.5 Sistemas basados en reglas

### 2.4.5.1 Estructura

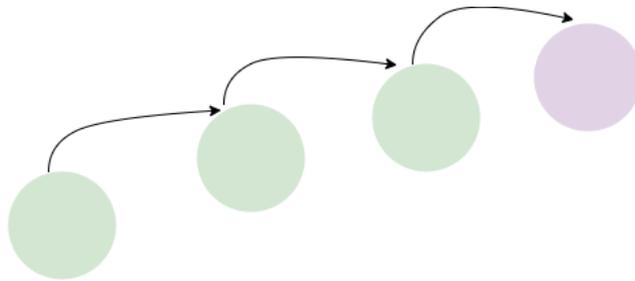
Un SE basado en reglas se compone de 5 elementos esenciales (Nagori, 2014):

- **Base de conocimiento (BC):** contiene información sobre el tema de interés.
- **Base datos:** integrada por el conjunto de hechos (premisas).
- **Motor de inferencia:** elemento que procesa las reglas para poder llegar a una conclusión.
- **Motor de explicación:** busca dar una justificación del por qué se ha llegado a cierta conclusión/solución.
- **Interfaz de usuario:** funge como intermediario entre el usuario y el SE.

### 2.4.5.2 Tipos

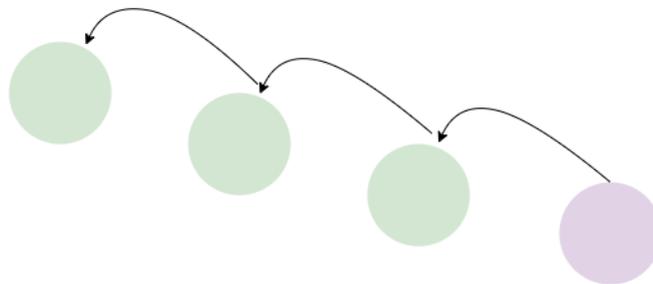
Los SE basados en reglas se dividen en dos tipos y esto se debe a la técnica de inferencia que aplican:

**Encadenamiento hacia adelante:** emplea hechos o premisas para llegar a cierta conclusión, el proceso finaliza cuando se confirma que existe una solución, por ende, existió una coincidencia entre las reglas preestablecidas y las premisas dadas (Mzori, 2015). Aprovechado cuando se conocen todas las premisas y, por lo tanto, se puede identificar el consecuente, es decir, las reglas tienen información amplia sobre el tema de interés.



*Ilustración 3 Encadenamiento hacia adelante. Elaboración propia.*

**Encadenamiento hacia atrás:** encadenamiento que parte de un objetivo, el motor de inferencia indaga las premisas que satisfacen tal conclusión (objetivo), y es cuando el proceso se da por finalizado. Útil cuando se sabe una solución hipotética y después se emplean las premisas para demostrarla (Nagori, 2014).



*Ilustración 4 Encadenamiento hacia atrás. Elaboración propia.*

## 2.5 Métricas para evaluar sistemas expertos

Como es de esperarse y como ocurre en otras áreas, los productos, equipos, máquinas, etc., deben probarse ante diversos escenarios con el objetivo de observar su reacción ante cualquier suceso, en el caso de los modelos de aprendizaje automático se verifica mediante la evaluación de su rendimiento de recomendación/predicción.

Una validación ideal probaría la robustez del algoritmo ante cualquier escenario y con diferentes datos de entrada. No tan solo se debe medir la precisión del mismo, ya que, posiblemente muestre buenos resultados, más bien incluir otras métricas de evaluación, con el afán de cubrir puntos ciegos y a su vez minimizar malas predicciones. En seguida se explican algunas métricas de evaluación (Varoquaux & Colliot, s.f).

### 2.5.1 Matriz de confusión

La matriz de confusión es una herramienta utilizada en el campo del aprendizaje automático y la estadística para evaluar el desempeño de un modelo de clasificación (Berrar, Flach, & Cave, 2012). Se muestra como una tabla e indica el número de predicciones satisfactorias y erróneas realizadas por el modelo en cada categoría. Además, proporciona información detallada sobre los tipos de errores que genera el modelo, como falsos positivos y falsos negativos.

La matriz de confusión funciona asignando las predicciones del modelo a diferentes categorías o clases y luego comparándolas con las etiquetas reales en los datos de prueba. En la diagonal principal de la matriz se alojan valores que son predicciones correctas, mientras que los valores fuera de dicha diagonal corresponden a predicciones falsas. La matriz de confusión está organizada de tal manera que las filas representan las etiquetas reales y las columnas representan las etiquetas esperadas (Galar, Fernández, Barrenechea, Bustince y Herrera, 2011).

La Tabla 14 muestra cómo construir una matriz de confusión:

- Verdaderos positivos (TP): predicción verdadera y verdadero en realidad
- Verdaderos negativos (TN): predicción verdadera y falso en realidad
- Falsos positivos (FP): predicción verdadera y falso en realidad

- Falsos negativos (FN): predicción falsa y verdadera en realidad.

Valor actual	Resultado de la predicción	
	Positivo	Negativo
Positivo	TP	FN
Negativo	FP	TN

*Tabla 14 Estructura matriz de confusión.*

La matriz de confusión permite identificar errores de Tipo I y II. El error de Tipo I equivale a Falsos Positivos (FP), mientras que el segundo a Falsos Negativos (FN). En este sentido, los resultados FN tienen consecuencias más graves que los FP.

En pocas palabras, es una herramienta de gran ayuda para evaluar el rendimiento de un modelo de clasificación porque proporciona información sobre cómo realiza la clasificación el modelo. A partir de esta matriz, se pueden calcular otras métricas de evaluación, como la precisión, el recall (también llamado sensibilidad) y la especificidad. Estas medidas ayudan a comprender cómo el modelo clasifica las diferentes categorías e identificar áreas de mejora (Zou, O'Malley, & Mauri, 2007).

### **2.5.1.1 Métrica de exactitud**

La métrica de exactitud es una medida utilizada en el campo del aprendizaje automático y la evaluación de modelos de clasificación para medir qué tan preciso es un modelo en sus predicciones (Provost & Fawcett, 2013). Muestra la proporción de predicciones correctas realizadas por el modelo en función del total de recomendaciones evaluadas.

La exactitud se mide dividiendo el número de predicciones correctas realizadas por el modelo entre el total de predicciones realizadas (Provost & Fawcett, 2013). Es una métrica simple y fácil de interpretar, ya que ofrece la proporción de predicciones correctas en relación con el conjunto de datos evaluado.

En resumen, es un Instrumento utilizado para evaluar el rendimiento general de un modelo de clasificación y proporciona una medida global de su capacidad para realizar predicciones correctas (Provost & Fawcett, 2013). Sin embargo, es importante tener en cuenta que la exactitud puede ser engañosa en ciertos escenarios, especialmente cuando se enfrenta a conjuntos de datos desequilibrados en términos de la distribución de las clases.

$$\text{exactitud} = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN}$$

### 2.5.1.2 Métrica de exhaustividad/sensibilidad

La métrica de exhaustividad, también conocida como recall o sensibilidad, es una medida utilizada en el campo del aprendizaje automático y la evaluación de modelos de clasificación para evaluar qué proporción de instancias positivas se identifican correctamente (Provost & Fawcett, 2013). Representa la capacidad del modelo para encontrar y capturar todos los casos positivos presentes en los datos.

La exhaustividad se obtiene dividiendo el número de verdaderos positivos (instancias positivas correctamente identificadas) entre la suma de los verdaderos positivos y los falsos negativos (instancias positivas que fueron clasificadas incorrectamente como negativas) (Provost & Fawcett, 2013). Esta métrica proporciona información sobre la capacidad del modelo para evitar perder instancias positivas.

Mecanismo empleado para analizar la productividad de un modelo de clasificación, especialmente en casos en los que es crucial minimizar los falsos negativos, es decir, los casos positivos que se clasifican incorrectamente como negativos (Provost & Fawcett, 2013). Es especialmente relevante en problemas en los que es importante identificar correctamente todas las instancias positivas, como en la detección de enfermedades o la identificación de fraudes.

$$\text{recall} = \frac{TP}{TP+FN}$$

### 2.5.1.3 Métrica de precisión

La métrica de precisión es una medida utilizada en el campo del aprendizaje automático y la evaluación de modelos de clasificación para evaluar la proporción de instancias clasificadas correctamente como positivas en relación con todas las instancias clasificadas como positivas por el modelo (Provost & Fawcett, 2013). Representa la capacidad del modelo para realizar predicciones precisas y evitar clasificar incorrectamente instancias negativas como positivas.

La precisión se calcula dividiendo el número de verdaderos positivos (instancias positivas correctamente identificadas) entre la suma de los verdaderos positivos y los falsos positivos (instancias negativas que fueron clasificadas incorrectamente como positivas) (Provost & Fawcett, 2013). Esta métrica proporciona información sobre la capacidad del modelo para evitar realizar clasificaciones incorrectas y minimizar los falsos positivos.

Comúnmente empleado en casos en los que es importante minimizar los falsos positivos y garantizar una clasificación precisa de las instancias positivas (Provost & Fawcett, 2013).

Es especialmente relevante en problemas en los que clasificar incorrectamente una instancia como positiva puede tener consecuencias negativas o costosas, como en la detección de spam o en sistemas de diagnóstico médico.

$$\text{precisión} = \frac{TP}{TP+FP}$$

### 2.5.5 Puntuación F1

La métrica F1 es una medida utilizada en el campo del aprendizaje automático y la evaluación de modelos de clasificación que combina la precisión y la exhaustividad en una sola métrica para proporcionar una medida equilibrada del rendimiento del modelo (Powers, 2021). El F1 es una medida de la media armónica entre la exhaustividad y la precisión, lo que significa que toma en cuenta los verdaderos positivos, los falsos positivos y falsos negativos.

El cálculo del F1 se realiza mediante la fórmula  $F1 = 2 * (\text{precisión} * \text{exhaustividad}) / (\text{precisión} + \text{exhaustividad})$  (Powers, 2021). Esta métrica combina la precisión y la exhaustividad de manera que premia un equilibrio entre ambas, lo que significa que es útil

cuando se desea tener un balance entre la minimización de los falsos positivos y los falsos negativos.

La métrica F1 es utilizada para examinar el desempeño de un modelo de clasificación cuando tanto la precisión como la exhaustividad son importantes y se desea encontrar un equilibrio entre ambas (Powers, 2021). Es especialmente útil en casos en los que clasificar incorrectamente una instancia como positiva o negativa puede tener consecuencias significativas y se busca un compromiso entre evitar falsos positivos y falsos negativos.

$$F1 = 2 * \frac{\text{precisión} * \text{recall}}{\text{precisión} + \text{recall}}$$

Evidentemente, la clase de datos debe estar equilibrada para obtener buenos resultados, el SE desarrollado pasará por las métricas antes citadas. En el apartado de resultados se expondrá el diseño experimental de dicha evaluación y por consiguiente se mostrará el desempeño del mismo.

## 2.6 Análisis del estado del arte

En esta sección se abordarán los sistemas expertos en el sector de la agricultura de precisión, partiendo del primer objetivo específico de investigación: *Revisar el estado del arte para evaluar los diferentes métodos relacionados con la dosificación de fertilizantes existentes en el mercado y determinar las características deseables para la solución a desarrollar*. Con la finalidad de averiguar cómo modelan y validan la base de conocimiento, técnicas empleadas para su desarrollo y qué parámetros (condiciones del suelo, climáticas o entre otras) consideran para formular la sugerencia o recomendación, siendo de los rasgos principales a identificar.

En total se hallaron 26 documentos afines con el tema de investigación. Estos artículos son agrupados con base en su información, en primer lugar, se exponen trabajos relacionados con la dosificación de fertilizantes, posteriormente, escritos vinculados con SE basados en reglas y finalmente otros SE que recurren a alguna otra técnica de inteligencia artificial.

Wang (2021) desarrolló un sistema experto de nutrientes bajo el enfoque QUEFTS para el cultivo de la papa, el cual fue comparado con 4 métodos clásicos de recomendación de fertilizante. Aclarando que este proceso es relativamente superior a otras técnicas. El

programa mostró una eficacia positiva con respecto al rendimiento de los cultivos, la rentabilidad económica, y la eficiencia en el uso del abono. El SE ha sido probado en China, Indonesia, Filipinas y entre otros países. En términos generales, suministrar la cantidad adecuada de sustancias químicas ricas en nutrientes aumentó el contenido de almidón, proteína soluble, y vitamina C, reduciendo la aplicación del 29% de N, 39% P, 10% K.

Córdova et al (s.f.) diseñaron un SE dosificador de fertilizante para el plátano, apoyándose de la programación lineal. Para emitir dicha recomendación el SE contempla como parámetros el análisis del terreno, tipo de riego, tamaño de la parcela. El software sugiere diversos abonos y su costo total de inversión. Haciendo uso de diversas tecnologías para su programación: Python, Django y PostgreSQL. En función de las características de la planta, calidad del suelo y del clima, Firmansyah et al, (2021) crearon un SE dinámico basado en reglas para recomendar el tipo, frecuencia y cantidad de abono para el cultivo de palma aceitera. Para adquirir la base de conocimiento acudieron a la literatura.

Al igual que Córdova et al (s.f.), Bandala et al (2020) consideraron las condiciones del suelo (nivel de nitrógeno, fósforo, potasio y la estación del año) para recomendar una cantidad adecuada de fertilizante, en este caso para el cultivo de arroz. Gracias a estos 4 parámetros el SE realiza diferentes combinaciones de fertilizante: completo, Urea, Solophos y Muriato. Lo anterior fue posible a la técnica de lógica difusa. En específico se implementaron 64 reglas. En cambio, Arias et al (2018) realizaron un sistema para la recomendación de fertilizantes y enmiendas para el pasto (hierba para el ganado). Apoyándose de redes neuronales artificiales. Para emitir dicha sugerencia los autores trabajaron con un dataset de 44 registros. De las 44 observaciones el 80% se eligió para entrenar el modelo y el 20% para su validación. El programa informático fue capaz de recomendar cloruro de potasio, fosfato diamónico, sulfato de cobre y de zinc. Importante mencionar, los datos resultaron ser muy escasos en las pruebas realizadas.

El trabajo de Bandala et al (2020) y Dayalini et al (2021) tienen en común que desarrollaron un sistema para la dosificación de fertilizante para el cultivo del arroz. Salvo que este último añade otros módulos, detección de enfermedades y predicción de la

idoneidad del terreno para 28 opciones de plantío, bajo cinco categorías principales. En general, para realizar las recomendaciones emplearon las condiciones del suelo, clima, año y periodo de siembra. Algunos de estos datos fueron proporcionados por instituciones gubernamentales o bien recuperados mediante dispositivos IoT. A continuación, se presenta la técnica utilizada y su porcentaje de precisión:

- Predicción de precipitaciones (bosques aleatorios): 96%
- Predicción de estiaje (bosques aleatorios): 100%
- Predicción de enfermedades (red neuronal de convolución): 95%
- Predicción de idoneidad en selección de cultivos (bosques aleatorios): modo instantáneo y experto: 98.34% y 98.21% respectivamente
- Recomendación de abono (árbol de decisión): 99.68%.

Es notorio que los sensores son de gran ayuda para monitorear las condiciones del suelo, Dayalini et al (2021), Dabre et al (2018), Irawan et al (2017) y Ambildhuke & Banik (2022) recurren a esta tecnología para obtener información del terreno. Siendo uno de los métodos más usados para integrar la base de conocimiento.

En concreto Dabre et al (2018) propusieron una arquitectura de sensores para monitorear en tiempo real las condiciones del suelo (nivel de pH y de NPK) en el cultivo de la papa. El software se compone de dos módulos: preprocesamiento y predicción. En función de la información recolectada realiza un análisis y posteriormente una recomendación de fertilizante y/o plaguicida en caso de deficiencia de nutrientes o bien al detectar una plaga. La recomendación de fertilizante es posible al emplear la lógica difusa.

De forma similar, Ambildhuke & Banik (2022) emplearon un sensor NPK para monitorear las condiciones del suelo. Una vez recolectados los datos se comparan con valores anteriores, en caso de encontrar una deficiencia de cualquier nutriente, el sistema envía un SMS al agricultor con la cantidad correcta de fertilizante y el tipo a proveer, en el momento y lugar adecuado. Así evita aplicar la sustancia en toda la superficie. Los autores sugieren emplear abonos orgánicos o biofertilizantes en combinación de sustancias químicas, en

lugar de ingredientes sintéticos como única opción. Con el afán de reducir el impacto ambiental.

A diferencia de los otros trabajos, Irawan et al (2017) realizaron un sistema de automatización de control de nutrientes, pero en cultivos hidropónicos. Explotando tres tipos de sensores para monitorear el pH, conductividad eléctrica, temperatura, etc.

Considerando que existen diversas técnicas de IA, en el trabajo de Bimantio et al (2021) plantean un SE para detectar carencias de nutrientes en el cultivo de la palma aceitera. Específicamente analizaron las hojas, las cuales fueron preprocesadas aplicando el método de detección de bordes, definiendo escalas de deficiencia gracias a un análisis RGB.

Los trabajos antes mencionados tienen como objetivo sugerir la mejor cantidad de fertilizante considerando las condiciones del suelo, clima, tipo de cultivo, tamaño de parcela, etc. Dosificar una porción equilibrada de abono puede acrecentar la productividad de los cultivos, reduciendo su costo de adquisición y el impacto ambiental.

Enseguida se exponen otros trabajos relacionados, los cuales emplean reglas para solventar dicha problemática, apoyándose del encadenamiento hacia adelante.

Delgado et al (2017) diseñaron un SE basado en reglas apoyándose del encadenamiento hacia adelante como método de inferencia para el control y seguimiento del cultivo de maíz. Abarcando fases que van desde la preparación del suelo, siembra, crecimiento, floración e incluso detección de plagas y malezas.

De forma semejante, Ameilia et al (2018) desarrollaron un SE basado en reglas siguiendo el mismo encadenamiento, adicionalmente, sumaron el factor de certeza. Al comparar los resultados del SE con los de un experto humano este presentó una similitud del 100%. La BC fue adquirida mediante la literatura y validada por expertos. Los autores recalcan que tomar las mejores decisiones a lo largo del ciclo de cultivo, permite incrementar el rendimiento de las plantas (orquídea negra).

En tanto, Angeles et al (2017) desarrollaron un SE para detectar, diagnosticar y prescribir opciones de control de enfermedades en el cultivo de arroz, proporcionando los resultados vía app móvil. La BC es adquirida al entrevistar expertos del área.

Hutapea et al (2019) formularon un SE para detectar enfermedades en la palma aceitera, tomando en cuenta las características de esta. El SE fue simulado 4 veces, al comparar las salidas contra las sugerencias de un experto humano, manifestó una eficiencia del 100%. La BC es construida gracias a información proporcionada por especialistas, revisando la literatura e investigaciones de campo. PHP fungió como lenguaje de programación.

Continuando con la temática de diagnósticos de enfermedades, Agustina et al (2017) proponen un SE basado en reglas para detectar malestares en el *Zea mays*. Para manejar la incertidumbre del software emplearon el factor de certeza, asignando un peso a cada síntoma. El SE ostentó una precisión del 73.81%. PHP y MySQL fueron las tecnologías usadas para su construcción. En la misma sintonía, Avelino et al (2019) programaron un SE para identificar la presencia de roya en plantas de café colombiano, catalogando su existencia como baja, media o alta. Mientras tanto, para conformar la BC crearon 96 reglas, señalando que se deben agregar más, a fin de impulsar la eficacia del mismo. La efectividad del SE fue del 66.7% al comparar las sugerencias de este contra las de un experto. Gracias a Python y a la librería PyKnow fue posible su desarrollo. Algo semejante ocurre, pero en la planta de mango, Pramokchon & Trongtorkid (2018) proponen un SE para clasificar y detectar enfermedades. La BC es proporcionada por la literatura y expertos. El sistema mostró una precisión del 89% al ser probado con 129 hojas infectadas. Árbol de decisión fungió como técnica de IA para solventar la problemática y Weka 3 como herramienta de trabajo.

Considerando los estudios anteriores, los SE basados en reglas muestran una buena precisión, siempre y cuando la información sea robusta. Arifin et al (2017) conformaron una BC gracias a expertos en la planta de bambú, desarrollando una aplicación móvil programada en Java.

Con la finalidad de identificar la diversidad de especies de esta planta, ya que, entre sí, suelen ser muy similares y un software es de gran ayuda. Al comparar los resultados del SE contra los de un versado en el tema, el sistema reveló una precisión del 100%. Aclarando que el usuario no debe contestar todas las preguntas para obtener una sugerencia confiable.

Finalmente, el mercado siempre requerirá de productos de calidad y ante esta preocupación, Morajkar & Patkar (2021) proponen un sistema para clasificar la palma aceitera. Siguiendo un enfoque difuso. En particular desarrollaron y probaron una técnica, la cual acorta las variables de entrada con la intención de otorgar el mejor conjunto, lo anterior reduce el número de reglas empleadas. Después de comparar las salidas del SE con las de un humano, el programa exhibió una gran similitud.

Esta tercera sección, ilustra trabajos encaminados a mejorar la toma de decisiones en el ciclo de cultivo, salvo que estos emplean otras técnicas de IA, como teorema de bayes, redes neuronales auto normalizadas o bien agentes conversacionales.

Gupta & Ratre (2020) adquirieron un dataset de 1506 registros. Con el propósito de abastecer una red neuronal de retropropagación con el objetivo de predecir la venta de fertilizante por adelantado, con una tasa de error menor al 10%. Buscando aportar nuevas tendencias al sector agrícola. Casi en el mismo sentido, Shu (2020) diseñó y probó una red neuronal auto normalizada para predecir el rendimiento de la soja, ya que hoy en día se requiere saber con certeza si la cosecha va a contrarrestar la demanda, siendo una arquitectura de aprendizaje profundo y emergente en el área de IA. Esta técnica fue comparada con algoritmos tradicionales del sector, obteniendo mejores resultados. En específico requirió de 8.47 min. para emitir la recomendación, al emplear un gran volumen de datos. El autor empleó Python como lenguaje de programación.

El trabajo de Balasahe et al (2018) propone un SE para mejorar la producción del algodón y la soja. Dicho sistema incluye un calendario climático dinámico para guiar los cultivos mencionados. Al probar el SE mostró una precisión del 97%. La BC es proporcionada por el Departamento de Meteorología de la India. La plataforma emite su recomendación vía app web, Java y PostgreSQL son las tecnologías empleadas para su construcción.

En el cultivo de maíz, Akbar & Ikorasaki (2018) desarrollaron un sistema experto para detectar enfermedades en dicho cereal. Emplearon el teorema de Bayes para verificar la exactitud del SE. Según los autores el software manifestó una precisión del 90%, pero en

ningún momento mencionan cómo adquirieron o validaron la BC. Algo semejante ocurre en el estudio de Cassandra & Sari (2018) ya que emplean la misma técnica para detectar infecciones en la planta de arroz. La BC es proporcionada por la literatura y expertos. Identificando 25 síntomas y 19 padecimientos.

Tomando en cuenta que las condiciones del suelo varían en cada región, Kartiko et al (2021) proponen un SE para determinar la idoneidad de terreno en cultivos frutales, recurriendo a la técnica de razonamiento basado en casos. PHP y MySQL fueron las tecnologías empleadas para su desarrollo. Al realizar 2 pruebas con el SE, la primera experimentación reveló una precisión del 100% probando la similitud con la base de casos. La segunda empleó 30 y obtuvo una exactitud del 80%.

Por último, Abdullah et al (2018) realizaron un chat conversacional con ayuda de Python y Flask. Al usar la aplicación móvil los agricultores ingresan sus preguntas mediante audio y/o texto. Donde estas son respondidas para dar consejos sobre el cultivo de la papa en particular considera la cantidad de riego, fertilizante o plaguicida a suministrar y tipo de semillas a plantar.

Para finalizar con esta revisión de la literatura, se han identificado diversos estudios aplicados en diferentes tipos de cultivos, sin duda, restan muchos por abarcar. Dado que gran parte de los autores se centra en cultivos específicos. En este sentido, los investigadores emplean múltiples técnicas, entre las que destacan: sistemas basados en reglas, algoritmos de aprendizaje automático; árboles de decisión o redes neuronales.

Sin lugar a duda, recurrir a programas informáticos para mejorar la toma de decisiones es lo más apropiado en este sector, ya que, la información suele ser muy volátil de una región a otra. Por consiguiente, un software puede ser de gran ayuda en una zona, pero a la más próxima puede que no.

## Capítulo 3: Diseño del sistema basado en reglas

Después de analizar 25 estudios, los sistemas expertos se centran en cultivos como el arroz, palma aceitera, maíz, papa, etc. Identificando que el arroz y el maíz son de los principales cereales que se cultivan en el territorio mexicano. Considerando estos últimos, se vislumbra un área de oportunidad para mejorar su rendimiento, por ejemplo, en investigaciones relacionadas al maíz, se enfocan en detectar enfermedades a lo largo del ciclo de cultivo. Sería de gran ayuda proponer un SE para la dosificación de fertilizantes, puesto que, Veracruz es un notable productor a nivel nacional.

La mayor parte de los trabajos se concentran en la detección/diagnóstico de plagas y en la recomendación de sustancias químicas, pero en este último, ninguno abarca al *Zea mays*. Mientras que, para emitir las recomendaciones/sugerencias los SE toman como parámetros las características de la planta, las condiciones del suelo, un intervalo de tiempo, condiciones climáticas, entre otros.

Enseguida se presenta información más puntual para la programación del SE: herramientas de desarrollo, la estructura de la base de conocimiento, las variables que se toman en cuenta, la conformación de las reglas, la arquitectura y su implementación.

### 3.1 Herramientas de desarrollo

Después de analizar los resultados obtenidos en la RSL de sistemas expertos se identificaron diversas herramientas de desarrollo de software, en el siguiente esquema se analizan las más relevantes con el propósito de elegir las esenciales para la programación de este SE.

Tecnología	Ventajas	Desventajas
PHP	<ul style="list-style-type: none"><li>• Tecnología de código abierto.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mala calidad en manejo de errores.</li></ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Programación orientada a objetos.</li> <li>● Multiplataforma.</li> <li>● Multi propósito (programación backend y web).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Riesgo de seguridad si no se configura bien.</li> <li>● Necesariamente se debe emplear un servidor web para su funcionamiento.</li> </ul>
Java	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Tecnología de código abierto.</li> <li>● Baja curva de aprendizaje.</li> <li>● Orientado a objetos.</li> <li>● Multiplataforma y objetivo.</li> <li>● Compatible con diversas librerías.</li> <li>● Facilita el manejo de errores.</li> <li>● Seguridad de datos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Requiere de experiencia en programación.</li> <li>● Depende totalmente de Java Virtual Machine.</li> </ul>
Angular	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Tecnología de código abierto.</li> <li>● Facilita el desarrollo multiplataforma.</li> <li>● Aplicaciones web ligeras.</li> <li>● Sintaxis simple y fácil de aprender.</li> <li>● Sigue la arquitectura modelo-vista-controlador.</li> <li>● Tiene soporte de Google.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Curva de aprendizaje sustancial, se requiere de conocimientos en HTML, CSS y TypeScript.</li> </ul>
Weka 3.8	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Tecnología de código abierto.</li> <li>● Útil para el procesamiento de datos.</li> <li>● Compatible con java.</li> <li>● Interfaz gráfica intuitiva.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Admite conjuntos de datos pequeños.</li> <li>● Carga lenta en los datos.</li> <li>● Falta de algoritmos (Expert, E. R. P., 2022).</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No requiere código, todo se realiza mediante la interfaz gráfica. (Expert, E. R. P., 2022)</li> </ul>	
Drools	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resuelve problemas complejos con soluciones sencillas.</li> <li>• Las reglas se pueden almacenar en un solo lugar.</li> <li>• El algoritmo Rete no depende del número de reglas.</li> <li>• Compatibilidad con Java.</li> <li>• Ofrece una buena escalabilidad (Yerukala, 2021).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuando la lógica de negocio es simple, no tiene sentido emplear Drools</li> <li>• Un gran volumen de reglas dificultará la ramificación en la base de reglas (Yerukala, 2021)</li> </ul>

Tabla 15 Comparativa tecnologías para desarrollo del SE.

Después de analizar las tecnologías citadas en la Tabla 15, es importante mencionar que el SE estará disponible en una versión web. Por consiguiente, recurrir a Angular es la mejor opción, ya que emplea HTML, CSS y TypeScript. Por otro lado, Java es el lenguaje de programación más factible debido a la seguridad que ofrece y su compatibilidad con múltiples herramientas y librerías, entre las cuales se encuentra Drools. Esta tecnología facilita el manejo de reglas de negocio gracias a su algoritmo Rete, que proporciona un encadenamiento hacia adelante y atrás. A continuación, se presentan las tecnologías para el desarrollo del primer prototipo.

### 3.1.1 Drools

Framework que facilita la manipulación de reglas de negocio. Proporciona un motor de reglas que utiliza un encadenamiento hacia adelante o atrás. Internamente hace uso del algoritmo Rete facilitando que las reglas se ejecuten de forma eficiente. Siendo esta técnica la base de muchos sistemas expertos como Jess, CLIPS, entre otros.

Drools permite introducir nuevos cambios de forma rápida y económica. Asimismo, proporciona el lenguaje DRL para la creación de reglas de forma sencilla (Baeldung, 2022).

Una regla sigue la siguiente estructura:

*Rule “nombre de la regla”*

*<atributo>*

*When*

*<condiciones>*

*Then*

*<acciones>*

*End*

### **3.1.2 MariaDB**

MariaDB es una de las bases de datos más populares y de código abierto. Desarrollada por los creadores de MySQL, siendo una versión mejorada de la antes citada. Esta tecnología garantiza el cumplimiento de las transacciones ACID (MariaDB, 2022). Finalmente, gracias a la sencillez en su sintaxis permite crear bases de datos simples o complejas, igualmente es compatible con múltiples plataformas informáticas.

### **3.1.3 Angular**

Framework OpenSource para el diseño y desarrollo de aplicaciones de una sola página, escrito en Typescript. Desarrollado por Miško Hevery en el 2009, actualmente es mantenido por Google (Google, 2020). Una de las ventajas al momento de emplear angular es que separa de forma adecuada las capas Modelo-Vista-Controlador (MVC), por lo tanto, se tiene un código más flexible y fácil de mantener.

## **3.2 Estructura de la base de conocimiento**

La base de conocimiento es la parte esencial de un SE, ya que almacena información sobre un tema en particular. Esta puede almacenarse en una base de datos o un archivo, principalmente. En tanto, la representación del conocimiento plasma información del

mundo real que permite a un algoritmo informático resolver problemas de forma automática (Sayantini, 2018). Por ejemplo, si una persona tiene demasiada información de un área se le facilitará resolver determinados inconvenientes, en este sentido, mientras un programa informático tenga a su disposición más datos, mejores recomendaciones podrá realizar.

De acuerdo con autores citados por Patel y Jain (2017), la BC está integrada por conocimiento:

- Declarativo: abarca conceptos, hechos, objetos y se expresa en una frase.
- Procedimental: describe el proceso para alcanzar el objetivo, se plasma en reglas, estrategias, procedimientos u otros. Por su parte Sayantini (2018) contempla otros tres: estructural, metaconocimiento y el heurístico.

Como se mencionó en secciones pasadas, el SE a programar será uno basado en reglas, así que, contempla un tipo de conocimiento declarativo. Mientras tanto, para su representación, este software recae en la categoría de reglas de producción, además de que existe el basado en la red, estructura y lógico. Las reglas de producción siguen una estructura IF-THEN, siendo uno de los enfoques más populares, dado que, cada regla plasma un conocimiento independiente, son modulares y pequeñas. Asimismo, facilita la actualización o borrado de una de ellas sin afectar a las demás.

Contemplando que el conocimiento de este sistema será reflejado en reglas de producción, en seguida se mencionan las variables que serán tomadas en cuenta, después de tener entrevistas con especialistas en el tema, productores de la región de Coacoatzintla y luego de consultar la literatura.

En primera instancia, en la reunión del 23 de mayo del 2022 en las instalaciones del Instituto Tecnológico Superior de Xalapa. La Dra. Rosa María González Amaro integrante del Instituto de Ecología A.C., y gracias a su experiencia adquirida en diversos estudios y publicaciones con relación al cultivo de maíz. Donde actualmente se encuentra trabajando con productores de la región del municipio de Coacoatzintla con el mismo cultivo. Permitió

definir la importancia de ciertas variables en el crecimiento del maíz, como los son: pH, nitrógeno, fosforo y potasio.



*Ilustración 5 Reunión instalaciones ITSX con la Dra. Rosa*

Al consultar el libro de ¿Cómo crece y se nutre una planta de maíz? Escrito por Zaragoza et al (2019), se comprobó la relevancia de algunos nutrientes en el desarrollo del maíz. Entre las que destacan: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre.

Al contrastar la información obtenida por los diferentes medios, la Dra. Rosa, Zaragoza et al (2019), Córdova et al (s.f.), Dabre et al (2018), Ambildhuke & Banik e Irawan et al (2017), toman en cuenta los nutrientes primarios: NPK, así como, el pH y la conductividad eléctrica. Este último fue sugerido por el experto de la zona, integrante del departamento de Fomento Agropecuario del municipio anteriormente citado.

### **3.3 Variables óptimas y su importancia**

En esta sección se describen las variables más importantes que se deben considerar para llevar a cabo una recomendación de fertilizantes (NPK).

- **pH:** es un valor que va de 0 a 14, indica la disponibilidad de los nutrientes en el suelo. Si esta variable se encuentra en un rango medio, la mayoría de los nutrientes se encuentran presentes. Un nivel bajo determina limitaciones de NPK, calcio y magnesio. La solubilidad del hierro, fosforo, manganeso, zinc y cobre disminuye en

números altos (Barbaro et al, s.f.). Cuando se presentan problemas la cal permite aumentar este factor y el yeso minimiza su toxicidad. Especialmente en el cultivo de maíz, el pH preferido es entre 6 y 7.2 (Yara, 2017). Un análisis de suelo proporciona esta información.

- **Conductividad eléctrica:** permite monitorear la cantidad de sales disponibles en la solución. Básicamente es la capacidad en que un elemento puede conducir la corriente eléctrica. A mayor concentración de CE mayor presencia de sales. Se recomienda que la disposición de este sea menor a  $1\text{dS m}^{-1}$ , por consiguiente, facilita el manejo de esquemas de fertilización (Barbaro et al, s.f.).
- **Nitrógeno (N):** el maíz requiere de N para producir clorofila, aminoácidos y proteínas. Por lo general se recomienda una aplicación de N en 2 o 3 fracciones desde la siembra hasta el espigado. A partir de V6 la hortaliza absorbe más porcentaje de N y en comparación con los demás nutrientes este se requiere en superior proporción. Su déficit reduce el crecimiento de la planta y mazorca. (INTA, 2015; Zaragoza & Fertilab, 2019).
- **Fósforo (P):** se requiere en menor cantidad de N y hasta V6 la absorción es mínima. Impacta en el crecimiento de la mazorca-grano, mejora la calidad del cultivo, aumenta la resistencia del tallo, crecimiento de las raíces y eleva la productividad. Su deficiencia limita el desarrollo del elote y del grano, retrasa la madurez del cultivo, en etapas tardías, las hojas tienden a tornarse de un color morado (YARA, 2022; Zaragoza & Fertilab, 2019).
- **Potasio (K):** se considera un nutriente inmóvil en el suelo, pero muy móvil en la planta. Por lo general suele estar presente en aguas superficiales o en minerales del suelo. Su existencia incrementa el sistema de defensas, se traduce en un follaje sano, mejora el crecimiento de las raíces, aumenta la producción de proteínas y mejora la resistencia a insectos. Una deficiencia severa puede identificarse en tallos delgados, hojas color verde pálido y demora en el progreso del cereal. (YARA, 2022; Zaragoza & Fertilab, 2019).

Gracias a estas variables se puede realizar una recomendación básica de fertilizante. Indudablemente antes se debe efectuar un análisis de suelo para conocer el valor de cada

uno. En la siguiente sección se aborda la NOM-021-RECNAT-2000 la cual especifica la metodología que deben seguir los diferentes laboratorios que realizan este tipo de estudios.

### 3.3.1 Otras variables importantes

Considerando las variables descritas en la sección anterior, es preciso mencionar que existe una norma mexicana (NOM-021-RECNAT-2000) la cual establece las especificaciones de salinidad, clasificación de suelos, fertilidad, estudios y muestreos. Publicada por el Diario Oficial de la Nación en octubre del año 2000.

### 3.3.2 Clasificación de los suelos

A continuación, se muestran los rangos propuestos por la NOM-021-RECNAT-2000, los cuales serán de gran ayuda para conformar las reglas de producción.

Clasificación del pH:

Clasificación	pH
Fuertemente ácido	< 5.0
Moderadamente ácido	5.1 – 6.5
Neutro	6.6 – 7.3
Medianamente alcalino	7.4 – 8.5
Fuertemente alcalino	> 8.5

*Tabla 16 Clasificación del pH según NOM-021-RECNAT-2000. Por SEMARNAT, 2000.*

Interpretación de resultados de nitrógeno:

Clase	Nitrógeno total
Muy bajo	< 0.05
Bajo	0.05 – 0.10
Medio	0.10 – 0.15

Alto	0.15 – 0.25
Muy alto	> 0.25

*Tabla 17 Interpretación de resultados de nitrógeno según NOM-021-RECNAT-2000.*

Interpretación de resultados fósforo:

Clase	mg Kg <sup>-1</sup> de P
Bajo	< 5.5
Medio	5.5 – 11
Alto	> 11

*Tabla 18 Interpretación de resultados de fósforo según NOM-021-RECNAT-2000. Por SEMARNAT, 2000.*

Interpretación de resultado potasio:

Clase	K (cmol kg <sup>-1</sup> )
Muy baja	< 0.2
Baja	0.2 – 0.3
Media	0.3 – 0.6
Alta	> 0.6

*Tabla 19 Interpretación de resultados de potasio según NOM-021-RECNAT-2000. Por SEMARNAT, 2000.*

La NOM-021-RECNAT-2000 ofrece la metodología perfecta para sugerir diagnósticos precisos. Los laboratorios que siguen y recomiendan análisis de suelo bajo esta norma permiten formular mejores esquemas de fertilización.

### **3.4 Reglas para la base de conocimiento**

Después de conocer los fertilizantes, su concentración y las variables (NPK, pH, CE). Se elaboró un cuestionario con la finalidad de analizar las 60 reglas para la recomendación del fertilizante. Con la ayuda de un cuestionario y al crear 60 casos hipotéticos. La tarea del especialista agrónomo consistió en evaluar la veracidad de estos o en su caso agregar una

recomendación diferente. En seguida se muestran las reglas que emplea el SE después de comparar las respuestas de los formularios (ver [Anexos: Cuestionario: Evaluación de reglas](#)).

Reglas para sugerir el tipo de fertilizante				
ID	N	P	K	Recomendación
R1	Muy bajo	Bajo	Muy baja	Urea y Nutri wunder
R2	Muy bajo	Bajo	Baja	Urea y Nutri wunder
R3	Muy bajo	Bajo	Media	Urea y Triple 17
R4	Muy bajo	Bajo	Alta	Urea y DAP
R5*	Muy bajo	Medio	Muy baja	Urea y DAP
R6	Muy bajo	Medio	Baja	Urea y Nutri wunder
R7	Muy bajo	Medio	Media	Urea y Triple 17
R8	Muy bajo	Medio	Alta	Urea y DAP
R9	Muy bajo	Alto	Muy baja	Urea y Nitrato de potasio
R10	Muy bajo	Alto	Baja	Urea y Nitrato de potasio
R11	Muy bajo	Alto	Media	Urea y Triple 17
R12	Muy bajo	Alto	Alta	Urea y Triple 17
R13	Bajo	Bajo	Muy baja	Urea y Nutri wunder
R14	Bajo	Bajo	Baja	Urea y Nutri wunder
R15	Bajo	Bajo	Media	Urea y DAP
R16	Bajo	Bajo	Alta	Urea y DAP

R17	Bajo	Medio	Muy baja	Urea y Nutri wunder
R18	Bajo	Medio	Baja	Urea y Nutri wunder
R19	Bajo	Medio	Media	Urea y Triple 17
R20	Bajo	Medio	Alta	Urea y DAP
R21	Bajo	Alto	Muy baja	Urea y Nitrato de potasio
R22	Bajo	Alto	Baja	Urea y Nitrato de potasio
R23	Bajo	Alto	Media	Urea y Triple 17
R24	Bajo	Alto	Alta	Urea
R25	Medio	Bajo	Muy baja	Urea y Nutri wunder
R26	Medio	Bajo	Baja	Urea y Nutri wunder
R27	Medio	Bajo	Media	Urea y Triple 17
R28	Medio	Bajo	Alta	Urea y DAP
R29	Medio	Medio	Muy baja	Urea y Nitrato de potasio
R30	Medio	Medio	Baja	Urea y Nitrato de potasio
R31	Medio	Medio	Media	Urea y Triple 17
R32	Medio	Medio	Alta	Urea y DAP
R33	Medio	Alto	Muy baja	Urea y Nutri wunder
R34	Medio	Alto	Baja	Urea y Nutri wunder
R35	Medio	Alto	Media	Urea y Triple 17
R36	Medio	Alto	Alta	Urea
R37	Alto	Bajo	Muy baja	Urea y Nutri wunder

R38	Alto	Bajo	Baja	Urea y Nutri wunder
R39	Alto	Bajo	Media	Urea y Triple 16
R40	Alto	Bajo	Alta	Urea y DAP
R41	Alto	Medio	Muy baja	Triple 16 y DAP
R42	Alto	Medio	Baja	Triple 16 y Nutri wunder
R43	Alto	Medio	Media	Triple 16 y DAP
R44	Alto	Medio	Alta	DAP
R45	Alto	Alto	Muy baja	Nitrato de potasio y DAP
R46	Alto	Alto	Baja	Nitrato de potasio y DAP
R47	Alto	Alto	Media	Nutri wunder y DAP
R48	Alto	Alto	Alta	Nutri wunder y Triple 16
R49	Alto	Bajo	Muy baja	Nutri wunder y Triple 16
R50	Alto	Bajo	Baja	Nutri wunder y Triple 16
R51	Alto	Bajo	Media	Triple 17 y Nutri wunder
R52	Alto	Bajo	Alta	Triple 17 y Nutri wunder
R53	Alto	Medio	Muy baja	Nutri wunder y Nitrato de potasio
R54	Alto	Medio	Baja	Nutri wunder y DAP
R55	Alto	Medio	Media	Triple 16
R56	Alto	Medio	Alta	Triple 16
R57	Alto	Alto	Muy baja	Triple 16 y Nitrato de potasio
R58	Alto	Alto	Baja	Triple 16 y Nitrato de potasio

R59	Alto	Alto	Media	Triple 16
R60	Alto	Alto	Alta	Triple 16

Tabla 20 Reglas recomendación fertilizante.

### 3.5 El esquema de fertilización

Sugerir el tipo de fertilizante a suministrar, resulta muy básico. La cantidad y el momento de su aplicación es lo más importante y es lo que en realidad quiere conocer el productor.

Para calcular la cantidad de fertilizante se recurrió a la fórmula general de fertilización, propuesta en el “Manual Para el Cálculo de Fórmulas Generales de Fertilización” recién actualizado en el año de 2021 por Matadamas (2021). Según el documento, es imprescindible saber con qué fuentes disponemos (simples, binarias o ternarias), la superficie por fertilizar, cantidad del elemento requerida por el cultivo y la concentración del abono. La ecuación se muestra a continuación:

$$F = \frac{E(S)}{c}$$

Por Matadamas, 2021.

Donde:

F = cantidad de fertilizante inorgánico (kg).

S = Superficie a fertilizar (has).

E = Cantidad de elemento recomendada en la fórmula general de fertilización (kg).

c = Concentración de la fuente.

Gracias a esta fórmula el SE es capaz de proporcionar la cantidad adecuada de fertilizante, en la sección [3.2 Primer prototipo del sistema experto](#) se muestra una recomendación de NPK en su primera versión.

### 3.6 Primer prototipo del sistema experto

Después de comprender las diferentes variables que influyen en el crecimiento del maíz, al seleccionar las más relevantes: nitrógeno, fósforo, potasio, pH y conductividad eléctrica. Y

tomando en cuenta la NOM-021-RECNAT-2000, en seguida se presenta, el modelo de la base de datos, su arquitectura y sus interfaces gráficas.

### 3.6.1 Diseño de la base de datos

Las sugerencias proporcionadas por el SE serán almacenadas en una base de datos (MariaDB). Con el objetivo de que el productor las consulte en cualquier momento. Asimismo, el productor podrá registrarse en el SE, y con ello llevar un histórico de los mismos. La ilustración muestra el modelo relacional de la base de datos que emplea este software. En la cual se incluyen las variables antes mencionadas.

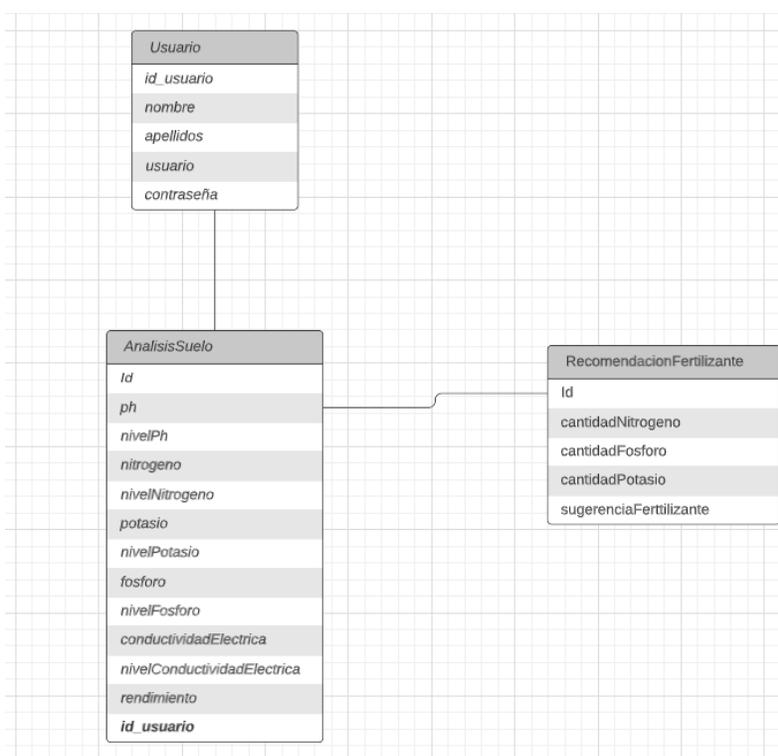


Ilustración 6 Modelo relacional - base de datos SE

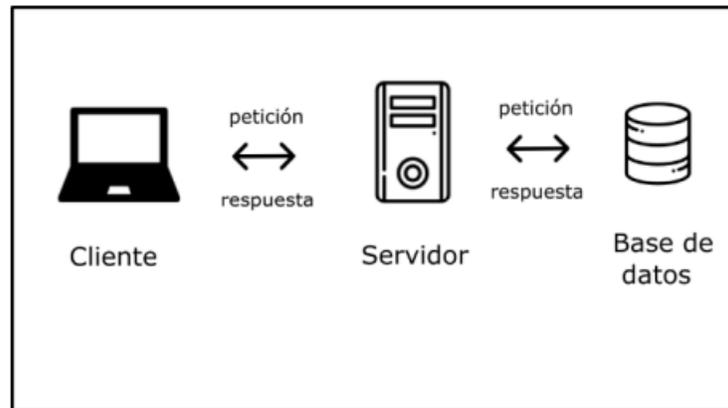
### 3.6.2 Arquitectura del sistema experto: cliente-servidor

De acuerdo con las tecnologías elegidas para el desarrollo de FMath (ver sección [1.9](#) Herramientas de desarrollo para más detalle) y después de integrarlas, así se distribuyó:

- Aplicación web: Angular
- Back-end: Java

- Base de datos: MariaDB.

Dada la unión entre las distintas tecnologías, la arquitectura del SE está basada en la arquitectura cliente-servidor.



*Ilustración 7 Arquitectura sistema experto*

La arquitectura cliente-servidor permite la distribución de las tareas entre el cliente y el servidor. Las aplicaciones clientes (Angular) realizan peticiones a una o varias aplicaciones servidores (Java/Spring Boot), las cuales deben estar en ejecución para responder a dichas demandas (Marini, 2012). Asimismo, para el desarrollo del SE se empleó la arquitectura REST (Transferencia de Estado Representacional) propuesta por Roy Fielding en su tesis doctoral en el año 2000 (Fielding, 2000). REST abarca un conjunto de restricciones, dando como resultado un estilo arquitectónico. Comúnmente es empleado en aplicaciones cliente-servidor. REST utiliza el protocolo HTTP, ya que es el mismo que emplea la internet, facilitando el uso de los métodos que brinda como: GET, PUT, POST y DELETE, etc.

La arquitectura REST comprende los siguientes fundamentos:

- Representación: hace referencia a los recursos que se envían entre el cliente y el servidor. Es este sentido para el intercambio de la información proporciona los siguientes medios, XML, HTML, JSON o texto plano (Para este proyecto se eligió el formato JSON, siendo un formato ligero y fácil de interpretar).

- Control por URI: un servicio web RESTful expone un conjunto de recursos que únicamente podrán ser accedidos mediante una URI.
- Uniformidad de las interfaces mediante peticiones HTTP: para acceder a los recursos se emplean los métodos que proporciona el protocolo HTTP: GET, PUT, POST, DELETE, entre otros.
  - GET: Consultar recursos.
  - POST: Modificar el estado de un recurso existente.
  - PUT: Crear un nuevo recurso.
  - DELETE: Eliminar un recurso

### 3.6.3 Implementación en Drools

Siguiendo la arquitectura antes relatada, y considerando la estructura de una regla en Drools:

```
Rule "nombre de la regla"
  <atributo>
When
  <Condición> <Evento n1, Evento n2, Evento n3...>
Then
  <Acción, respuesta, datos generados...>
End
```

Dentro del proyecto de Netbeans se crearon dos documentos, uno para la clasificación del suelo y el otro para la recomendación del fertilizante.

El primero se nombró “reglas-suelo.drl”, integra 60 reglas para clasificar el tipo de terreno. Abarca reglas para el pH, nitrógeno, fósforo, potasio y conductividad eléctrica. La Ilustración 8 tan solo muestra las reglas para la variable de potencial de hidrógeno, las demás siguen el mismo formato.

```

rule "ph fuertemente acido"
  when
    aSuelo: AnalisisSueloo(ph <= 5);
  then
    aSuelo.setNivelPh("Fuertemente acido");
end;
rule "ph moderadamente acido"
  when
    aSuelo : AnalisisSueloo(ph >= 5.1 && ph <= 6.5);
  then
    aSuelo.setNivelPh("Moderadamente acido");
end;
rule "ph neutro"
  when
    aSuelo : AnalisisSueloo(ph >= 6.6 && ph <= 7.3);
  then
    aSuelo.setNivelPh("Neutro");
end;
rule "ph medianamente alcalino"
  when
    aSuelo : AnalisisSueloo(ph >= 7.4 && ph <= 8.5);
  then
    aSuelo.setNivelPh("Medianamente alcalino");
end;
rule "ph fuertemente alcalino"
  when
    aSuelo : AnalisisSueloo(ph > 8.5);
  then
    aSuelo.setNivelPh("Fuertemente alcalino");
end;

```

*Ilustración 8 Reglas pH en Drools.*

En tanto, para la sugerencia del tipo de fertilizante, el archivo “reglas-fertilizante.drl” es el encargado de dicho trabajo. La ilustración 9 muestra la organización de este, a cada regla se le asigna un identificador (R1, R2, R4... R60), en el apartado del WHEN se compara el valor de NPK, proporcionado el tipo de fertilizante, en función de los parámetros.

```

rule "R7"
  when
    reFer:RecomendacionFertilizante(nitrogeno == "Muy bajo" && fosforo == "Medio" && potasio == "Medio");
  then
    reFer.setSugerenciaFertilizante("Urea y Triple 16");
end;
rule "R8"
  when
    reFer:RecomendacionFertilizante(nitrogeno == "Muy bajo" && fosforo == "Medio" && potasio == "Alto");
  then
    reFer.setSugerenciaFertilizante("Urea y DAP");
end;
rule "R9"
  when
    reFer:RecomendacionFertilizante(nitrogeno == "Muy bajo" && fosforo == "Alto" && potasio == "Muy bajo");
  then
    reFer.setSugerenciaFertilizante("Urea y Nutri Wunder");
end;

```

Ilustración 9 Reglas recomendación del tipo de fertilizante en Drools

### 3.6.4 Interfaz del sistema

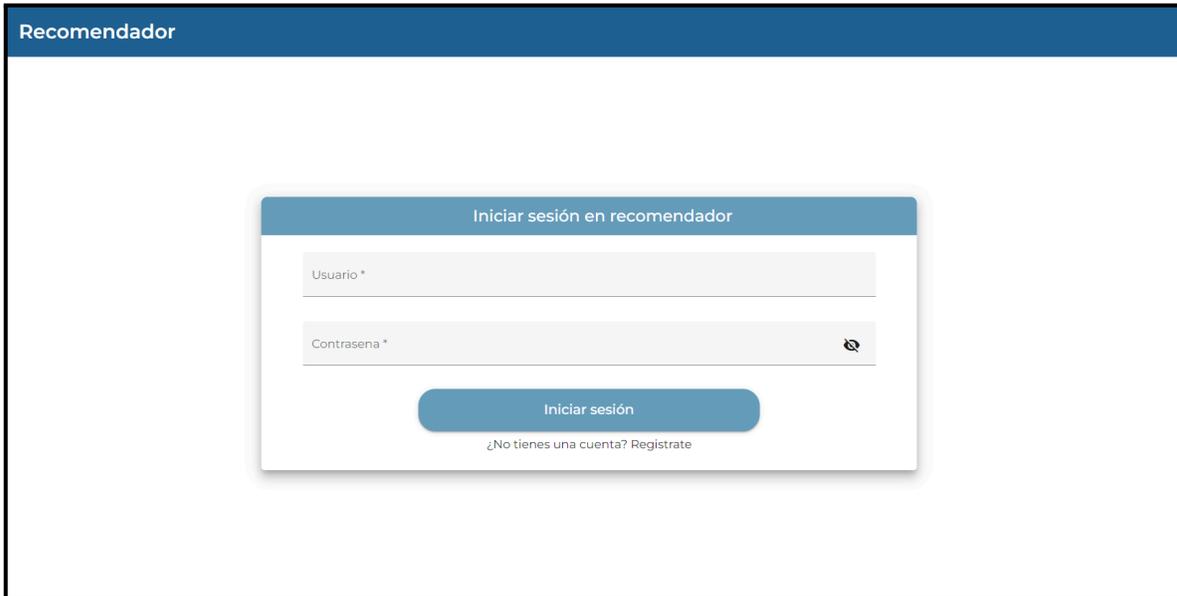
Una vez maquetado el diagrama relacional de la base de datos, formulado las reglas para la sugerencia del fertilizante, y al emplear las tecnologías de desarrollo antes citadas, en seguida se muestran las interfaces gráficas del SE.

Al ingresar a la página de inicio del sistema refleja una interfaz como la de la Ilustración 10.



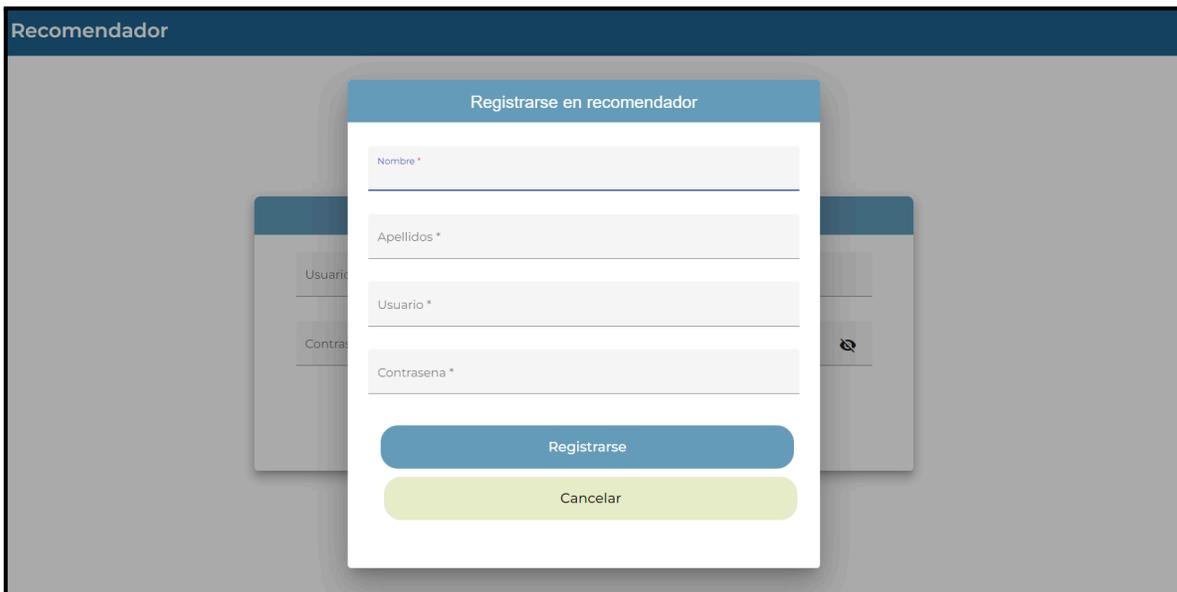
Ilustración 10 Home SE.

Al dar clic en la opción de “Obtener recomendación” el sistema redirige al usuario a la Ilustración 11, en caso de estar registrado únicamente ingresa sus credenciales e inicia sesión. Por otro lado, si no tiene una cuenta da clic en “Regístrate” y el software muestra la pantalla de la Ilustración 12.



The screenshot shows a web interface with a dark blue header labeled 'Recomendador'. In the center, there is a white modal box titled 'Iniciar sesión en recomendador'. Inside the modal, there are two input fields: 'Usuario \*' and 'Contraseña \*'. The password field has a small eye icon to its right. Below the fields is a blue button labeled 'Iniciar sesión'. At the bottom of the modal, there is a link that says '¿No tienes una cuenta? Regístrate'.

*Ilustración 11 Iniciar sesión SE.*



The screenshot shows the same 'Recomendador' header. A white modal box titled 'Registrarse en recomendador' is displayed over a dimmed background of the login form. The registration form contains four input fields: 'Nombre \*', 'Apellidos \*', 'Usuario \*', and 'Contraseña \*'. Below these fields are two buttons: a blue 'Registrarse' button and a light green 'Cancelar' button.

*Ilustración 12 Registrarse SE.*

Ya en la sección de recomendación, el usuario ingresa los datos pertinentes. El SE clasifica el tipo de suelo en función de los datos ingresados y sugiere la cantidad de fertilizante apropiada (Ilustración 13 y 14).

**Dosificador de fertilizante para cultivo de maíz**

Nota: ingrese el valor más aproximado

Nivel pH *	5	Nivel nitrógeno *	0.03
Nivel potasio *	0.2	Nivel fósforo *	2
Coductividad eléctrica *	5	Rendimiento esperado *	7.5 toneladas

Obtener recomendación      Cancelar

Ilustración 13 Recomendación.

**Clasificación del suelo en función de la NOM-021-RECNAT-2000**

Elemento	Nivel	Interpretación
pH	5	Fuertemente ácido
Nitrógeno	0.03	Muy bajo
Potasio	0.2	Bajo
Fósforo	2	Bajo
Conductividad eléctrica	5	Suelo salino

En función de los valores analizados fertiApp recomienda aplicar: **Urea y Nutri Wunder.**

De acuerdo con el rendimiento esperado se debe aplicar:  
**367.0 kg de Urea , 204.0 kg de Fósforo , 365.0 kg de Potasio**

Guardar      Cancelar

Ilustración 14 Clasificación del suelo, recomendación de cantidad y tipo de fertilizante.

Tomando en cuenta los datos ingresados y en función de la recomendación del SE. Urea y Nutriwunder serán los fertilizantes a suministrar en las cantidades apreciadas en la Ilustración 14.

## **3.7 Primer diseño experimental**

Una vez concluida la primera versión del SE se realizó un primer experimento en el invernadero del Instituto Tecnológico Superior de Xalapa. Con el objetivo de analizar el tratamiento de dos esquemas de fertilización en 20 plantas de maíz y determinar la validez de las variables a evaluar en un entorno real.

En primer lugar, se procedió a limpiar la superficie del mismo, quitando toda la maleza, tierra u objetos innecesarios. Considerando que en dicho terreno existía una plaga de hormigas se aplicó un químico especial para su regulación.

### **3.7.1 Clima**

El clima oscila entre los 8°C a 30°C dado que la siembra del maíz inició en la segunda semana del mes de noviembre de 2022, abarcando algunos frentes fríos y semanas cálidas.

### **3.7.2 Parcela**

El experimento se estableció en el invernadero del ITSX, empleando un área de 2.5 m de ancho por 3.5 m de largo. Cada semilla de maíz se colocó en una bolsa especial para cultivo de 50 x 50 cm, pasando el periodo de germinación esta se trasplantó al área común.

#### **3.7.2.1 Análisis físico**

La tierra empleada para este experimento fue recolectada en una parcela del municipio de Coacoatzintla, por lo que se tomaron algunas muestras y posteriormente fueron enviadas al INECOL para su análisis. Según los resultados proporcionados, el suelo carece de nitrógeno, ubicado en muy bajo. El nivel de fósforo se encuentra en un rango medio, mientras el potasio cuenta con una buena disponibilidad.

Propiedades químicas	pH	N total (%)	P (mg kg <sup>-1</sup> )	K (mg kg <sup>-1</sup> )
Valor	6	0	6.5	26
Clasificación (NOM-021-REC NAT-200)	Moderadamente ácido	Muy bajo	Medio	Alto

Tabla 21 Propiedades químicas del suelo.

### 3.7.3 Tratamientos y fertilización

En función de los resultados proporcionados se identificó un terreno con muy baja disponibilidad de nitrógeno, niveles medios y altos de fósforo y potasio respectivamente. Al ingresar los valores al SE, este recomendó una aplicación de UREA y DAP. Estos últimos satisfacen el faltante de los nutrientes antes citados.

Clasificación del suelo en función de la NOM-021-REC NAT-2000

Elemento	Nivel	Interpretación
pH	6	Moderadamente ácido
Nitrógeno	0	Muy bajo
Potasio	26	Alto
Fósforo	6.5	Medio
Conductividad eléctrica	7	Suelo salino

En función de los valores analizados fertiApp recomienda aplicar: **Urea y DAP.**

De acuerdo con el rendimiento esperado se debe aplicar:  
**169 kg de Nitrogeno, 55 kg de Fosforo y -11 kg de Potasio**

Guardar
Cancelar

Ilustración 15 Sugerencia de esquema de fertilización: invernadero ITSX.

La aplicación del esquema de fertilización se dividió en dos fases, la primera tuvo fecha el día 18 de noviembre de 2022 y la segunda el 20 de diciembre de 2022.

Tratamiento	Aplicación	Cantidad
-------------	------------	----------

A	N/A	0 kg
B	UREA y DAP	169 kg N y 55 kg P.

Tabla 22 Esquemas de fertilización en el invernadero del ITSX: tratamientos A y B.

### 3.7.4 Mediciones de la planta

Durante el crecimiento del cultivo se evaluaron las siguientes características:

- Altura de la planta (cm): se midió la altura de la planta, desde el nivel de la superficie del suelo con ayuda de una cinta métrica.
- Diámetro del tallo (cm): el diámetro del tallo se midió a 5 cm del suelo con el apoyo de un calibre.

Después de la cosecha:

- Número de granos por hilera: se seleccionó una hilera del elote y se contó la totalidad de granos.
- Granos totales: se multiplicó la cantidad de grano por hilera entre el número de hileras de grano.
- Peso total del grano: con ayuda de un cuchillo se desgranó el elote y se pesó en una báscula.
- Peso de la mazorca: se pesó en una báscula cada uno de los elotes expresado en kg.

### 3.3.4 Riego

El riego que se empleó fue por goteo artesanal. Se aplicó desde la siembra de la semilla, destinando 80 ml de agua por planta. El riego se dividió en dos aplicaciones: mañana y tarde.

### 3.7.5 Resultados

#### 3.7.5.1 Altura de la planta

Acorde a los resultados de la Tabla 23, en ninguna de las mediciones registradas a los 14 días existe diferencia significativa. Por esta razón, aplicar fertilizante en función de las

necesidades del suelo y no suministrar, tiene cero importancia. No obstante, a partir del día 60 las mazorcas del grupo B lograron una mayor altura con respecto al tratamiento A, a los 60 y 88 ddg se registró una diferencia de 16.4 y 18 cm respectivamente en relación al lote A.

**Nota:** Días después de la germinación" (DDG) se refiere al número de días transcurridos desde que una semilla ha germinado, es decir, desde que ha comenzado a crecer. Este término se usa comúnmente en la agricultura, la jardinería y la investigación de plantas para medir y describir el desarrollo de una planta desde el momento en que la semilla rompe su cáscara y empieza a formar raíces y brotes.

Tratamientos	14 ddg	48 ddg	60 ddg	88 ddg
A	13.37	61.8	89	113
B	13.28	69.7	105.4	131
C.V. %	13.27	31.63	34.59	33.75
ANOVA	°	°	°	°
p-valor	0.913	0.41	0.287	0.342

*Tabla 23 Resumen estadístico durante 88 ddg: altura de la planta, invernadero del ITSX.*

La Ilustración 16 muestra como la altura de planta es muy similar entre ambos, por lo que, en el modelo ANOVA no se registra ninguna diferencia significativa. Y es a partir del día 60 cuando las plantas del lote B alcanzan una mayor altura.

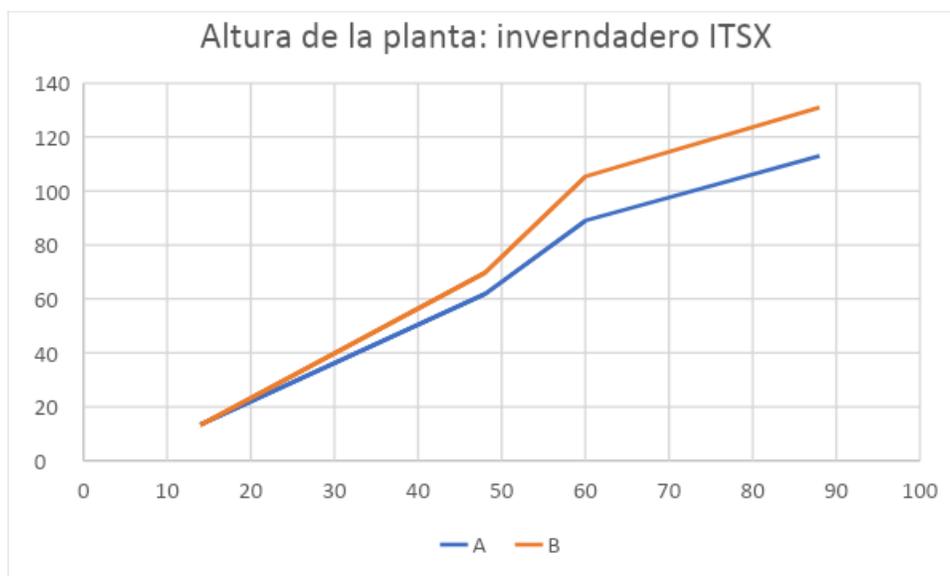


Ilustración 16 Altura de la planta durante 88 ddg: invernadero ITSX.

### 3.7.5.2 Diámetro del tallo

El análisis ANOVA indica nula diferencia entre los dos tratamientos, a los 14 ddg no existe disparidad, dado que, aún no se suministraba ningún químico. El único notable es justo después de la primera fase de fertilización, la sugerencia del SE alcanzó un mayor diámetro del tallo con 17.6 mm, es decir, 5.9 mm más que el lote A.

De ahí en adelante el crecimiento es muy similar entre sí, en consecuencia, el modelo ANOVA no detectó un cambio notable. En promedio, los tallos del lote B en las mediciones de los días 60 y 88 son superiores por 3.4 y 3.2 mm con respecto al grupo A.

Tratamientos	14 ddg	48 ddg	60 ddg	88 ddg
A	3	11.7	16.4	29.3
B	3	17.6	19.8	32.5
C.V. %	21.63	15.03	29.99	20.47
ANOVA	°	*	°	°
p-valor	1	0.026	0.161	0.261

Tabla 24 Resumen estadístico durante 88 ddg: diámetro del tallo, invernadero del ITSX.

De forma visual, la Ilustración 17 muestra el crecimiento del tallo durante 88 días de desarrollo. Como se apreció, el progreso es muy semejante, la única diferencia se observa antes del día 50.

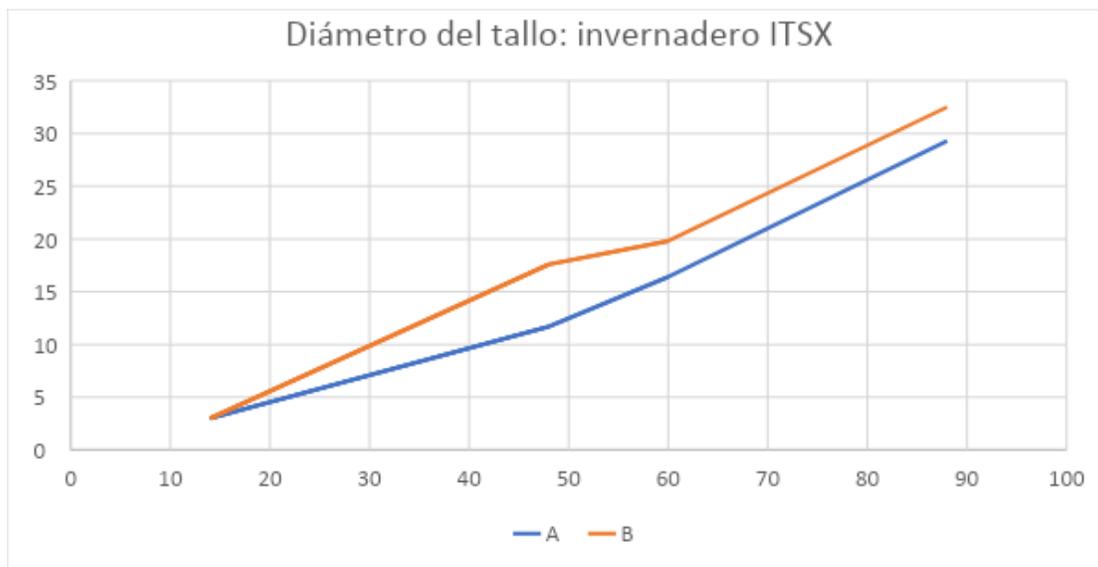


Ilustración 17 Diámetro del tallo durante 88 ddg: invernadero ITSX.

### 3.7.5.2 Diámetro del elote

Después de la cosecha, los resultados arrojados por ANOVA muestran que existe disparidad entre el lote A y B con p-valor igual a 0.006. Elotes del grupo B adquirieron un diámetro de 45.25 mm, a 8.75 mm de diferencia con respecto al tratamiento A.

A diferencia de los análisis pasados, fertilizar según las necesidades del suelo tiene grandes repercusiones en cuanto el diámetro del elote, en este sentido, el mejor estadístico se ubicó en el tratamiento B.

<b>Tratamiento</b>	
A	36.5
B	45.25
C.V. %	10.05
ANOVA	**
p-valor	0.006

*Tabla 25 Resumen estadístico durante 88 ddg: diámetro del elote (mm).*

### 3.7.5.3 Largo del elote

Por increíble que parezca, el tratamiento testigo obtuvo el mejor promedio con 22.4 cm de largo, 0.6 cm más que los elotes del grupo B. Aun con las dos fases de abono suministrado los resultados no fueron favorables y en general, el tamaño del producto es muy semejante entre sí. Evidentemente el resultado ANOVA no registró ninguna diferencia notable.

Tomando en cuenta estos datos para el siguiente experimento se tendrán que hacer algunos ajustes en la fórmula general de fertilización y hacer uso de una que se adapte a la región de estudio.

<b>Tratamiento</b>	
A	22.4
B	21.8
C.V. %	10.05
ANOVA	°
p-valor	0.760

*Tabla 26 Resumen estadístico durante 88 ddg: largo del elote (cm).*

### 3.7.5.4 Número de granos por hilera

A comparación del análisis anterior, los datos proporcionados en la Tabla 27 muestran que existe diferencia notable entre los dos grupos de estudio. De hecho, el tratamiento B manifestó los mejores resultados con 37 gramos en promedio por hilera, es decir, 12.25 más que el conjunto A. Con un valor de p igual a 0.001.

Desde este punto de vista, la fertilización aplicada influyó positivamente en el número de granos por hilera, al suministrar los nutrientes escasos: nitrógeno y fósforo.

Tratamiento	
A	24.75
B	37
C.V. %	24.87
ANOVA	***
p-valor	0.001

Tabla 27 Resumen estadístico durante 88 ddg: número de granos por hilera.

### 3.7.5.5 Granos totales

Como es de esperarse y en función de los promedios de la Tabla 28, los elotes del grupo B lograron el mejor estadístico con 530 granos totales. Muy por debajo se ubicó el lote A con 301.6 granos. En este sentido el modelo ANOVO si encontró una diferencia significativa, p-valor igual a 0.001.

<b>Tratamiento</b>	
A	301.6
B	530
C.V. %	32.60
ANOVA	***
p-valor	0.001

*Tabla 28 Resumen estadístico durante 88 ddg: granos totales.*

### **3.7.5.6 Peso del grano**

El análisis del número de granos por hilera y totales afectan directamente en el siguiente, por lo que, la evaluación de promedios reveló que el grupo B obtuvo el mejor estadístico con 92.4 gr, 41.4 gr más que el tratamiento A. Por consiguiente, el modelo ANOVA encontró una diferencia significativa con p-valor igual a 0.002.

En este sentido, las fases de fertilización aplicadas influyeron positivamente en la salud y bienestar de los elotes de maíz, al mostrar datos positivos en el número de granos por hilera, totales y en el peso del grano.

<b>Tratamiento</b>	
A	51
B	92.4
C.V. %	36.32
ANOVA	**
p-valor	0.002

*Tabla 29 Resumen estadístico durante 88 ddg: peso del grano.*

### 3.7.5.7 Peso del elote

En sintonía con los resultados anteriores, el estudio del peso del elote reveló que el tratamiento B obtuvo el mejor estadístico con 255.25 gr en promedio. Muy superior al del grupo A con apenas 161 gr y un p-valor igual a 0.0001.

Tratamiento	
A	161
B	255.25
C.V. %	26.13
ANOVA	***
p-valor	0.0001

Tabla 30 Resumen estadístico durante 88 ddg: peso del elote.

### 3.7.5.8 Conclusiones del primer experimento

En resumen, los resultados estadísticos previos indican que el tratamiento B se beneficia considerablemente de la fertilización adaptada a las necesidades del suelo. Por lo tanto, es aconsejable realizar un estudio del suelo para determinar el tipo de abono y las cantidades necesarias según los datos obtenidos.

El uso del sistema experto (SE) como herramienta de apoyo para productores, extensionistas e ingenieros agrónomos facilita la identificación del tipo de fertilizante y la cantidad de abono a aplicar, además de permitir la clasificación del terreno conforme a la NOM-021-RECNAT-2000.

A partir de estos resultados, resulta conveniente emplear una fórmula general de fertilización adaptada a la región montañosa central de Veracruz. Aunque el análisis de la altura de la planta y el largo del elote no reveló diferencias significativas, especialmente en las plantas del grupo A que no recibieron tratamiento de fertilización, el experimento sentó las bases para determinar los nutrientes a sugerir, clasificar el suelo según la norma

mencionada y establecer el número mínimo de plantas a estudiar en el siguiente experimento.

## Capítulo 4: Resultados

### 4.1 Proceso de mejora SE: segunda versión SE

La primera versión del SE realizaba una recomendación apropiada del tipo y cantidad de fertilizante a aplicar. En la segunda versión del software, se ajustó la fórmula general de fertilización para el cultivo de maíz, utilizando la dosis sugerida por el INIFAP: 150-46-30 de NPK, recomendada para la zona central del estado de Veracruz. Con esta modificación, las dosis por kilogramo experimentaron una leve variación.

Por otro lado, la primera versión de este SE no contaba con un módulo para revisar el historial de recomendaciones; en este sentido, se programó su interfaz gráfica. Como resultado, el usuario puede revisar su historial, ordenado por la fecha de creación. Además, se ha habilitado la posibilidad de editar alguna recomendación o eliminarla según sea necesario (Ilustración 18 y 19).



*Ilustración 18 Historial de recomendaciones.*



Ilustración 19 Ejemplo recomendación y clasificación del suelo.

## 4.2 Segundo experimento

Una vez ajustada la fórmula de fertilización, el SE ahora puede proporcionar una recomendación adaptada a las necesidades específicas del centro del estado de Veracruz. Con el propósito de comparar tres esquemas distintos de fertilizantes, a continuación, se describe el diseño experimental llevado a cabo en un entorno real para el cultivo de maíz elotero de temporada en el municipio de Coacoatzintla.

### 4.2.1 Objetivo

Analizar la aplicación de tres esquemas de fertilización en el cultivo de maíz, incluyendo el propuesto por un software, el empleado por un agricultor según su conocimiento empírico, y un testigo.

### 4.2.2 Objetivos específicos

- Identificar el mejor esquema de fertilización en función de la altura de la planta, diámetro del tallo y elote, largo del elote, número de granos por hilera y totales, así como el peso del grano y el elote.

- Analizar si la recomendación de un esquema de fertilización sugerido por un software basado en un análisis de suelo conlleva ventajas significativas en comparación con simplemente abonar sin conocer las características específicas de la parcela.

### **4.2.3 Ubicación**

El municipio de Coacoatzintla se ubica en la zona montañosa central del estado de Veracruz, en las coordenadas 19° 39' 9" Norte y 96° 56' 26" Oeste. Limita al norte con los municipios de Tlacolulan y Tonayán; al sur con Naolinco y Jilotepec (CEIEG, 2015).

Tiene una extensión territorial de 43.92 km<sup>2</sup>. Su clima es templado-húmedo, con una temperatura promedio de 12.5 °C, y disfruta de una precipitación pluvial media anual de 1780.3 mm (Veracruz Gobierno del Estado, s.f.).

### **4.2.4 Extensión**

Abarca una superficie de 43.92 km<sup>2</sup> y representa un 0.07% del estado (Veracruz, Gobierno del Estado, s.f.).

### **4.2.5 Hidrografía**

Se encuentra regado por arroyos pertenecientes al río Actopan.

### **4.2.6 Clima**

El clima en la región es semicálido húmedo con lluvias durante todo el año y templado húmedo con precipitaciones a lo largo de todas las estaciones. Las temperaturas varían entre los 16 y 20 °C, con un rango de precipitación que oscila entre 1,500 y 2,000 mm (CEIEG, 2015).

A continuación, las gráficas correspondientes (Ilustración 20 y 21) presentan la temperatura y precipitación promedio durante el período en que se llevó a cabo el experimento (enero - junio).

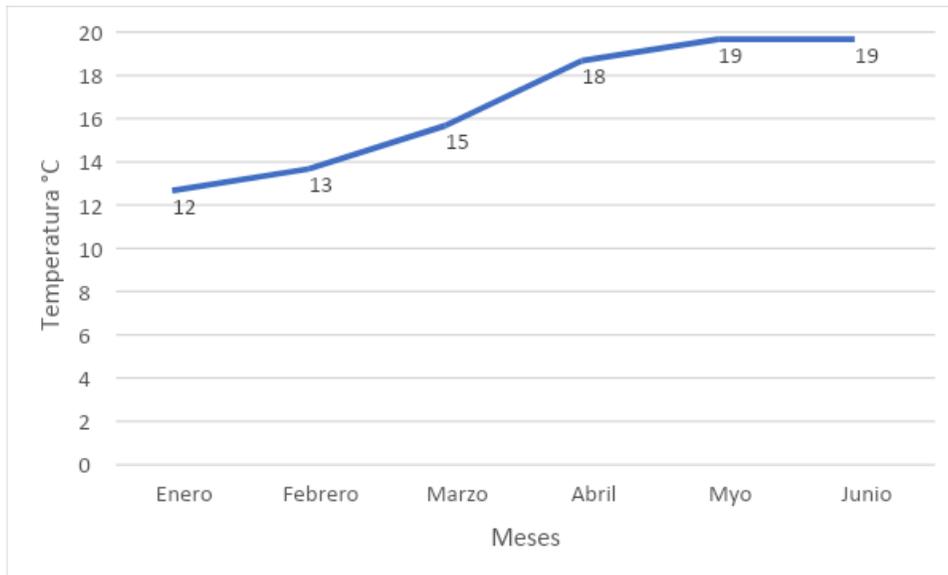


Ilustración 20 Temperatura promedio mensual: 2023. Datos obtenidos de: Weather Spark, 2023.



Ilustración 21 Precipitación promedio mensual: 2023. Datos obtenidos de: Weather Spark, 2023.

#### 4.2.7 Uso de suelo y vegetación

Por su uso de suelo se divide en: agricultura (32.66%) y zona urbana (1.93%); por vegetación: selva (11.87%) y pastizal (53.21%) (INEGI, 2010).

#### **4.2.8 Principales ecosistemas**

Predomina el bosque caducifolio y perennifolio con especies como el cedro, palo de agua, encino, caoba y nopal; donde se localiza una fauna como tejones, armadillos, conejos, tlacuaches (Veracruz Gobierno del Estado, s.f.).

#### **4.2.9 Recursos naturales**

Representada por minerales como los bancos de materiales y entre su vegetación destaca el pino por el valor de su madera (Veracruz Gobierno del Estado, s.f.).

#### **4.2.10 Materia vegetal**

Considerando las condiciones geográficas del municipio, la región de Coacoatzintla ha estado sembrando maíz híbrido A 7573 durante casi 10 años (González et al., 2022). Este híbrido se ha seleccionado debido a su adaptabilidad a prácticamente cualquier fecha de siembra y su aptitud destacada para la producción de elote. En consecuencia, para el presente estudio, se ha optado por utilizar la misma semilla, y se detallan sus principales características agronómicas en la siguiente tabla:

Características agronómicas del maíz A 7573	
Semilla	A 7573
Fecha de siembra	15 febrero/15 agosto
Altura de mazorca	120 – 140 cm
Altura de planta	210 – 230 cm
Ciclo	Intermedio
Densidad de siembra	50 mil semillas por hectárea
Días a cosecha	95 a 105
Días a floración	75 a 88 días
Riego	Si
Uso	Elote: Si Forraje: Si

*Tabla 31 Características agronómicas del maíz A-7573. Adapta de ASGROW, s.f.*

## **4.2.11 Parcelas**

Dadas las consideraciones anteriores, el experimento se llevó a cabo en dos áreas de estudio: Los Planes y Chapultepec, las cuales se describen a continuación.

### **4.2.11.1 Los Planes**

#### **4.2.11.1.1 Ubicación**

Los Planes se encuentra a una altitud de 1478 msnm y a 1.9 km del centro de Coacoatzintla. En esta área se implementaron dos tratamientos: la recomendación del SE y un enfoque tradicional basado en el conocimiento del agricultor, además de un testigo.

La topografía del terreno es completamente plana, como se observa en la Ilustración 22, cubriendo aproximadamente 7500 m<sup>2</sup>.



*Ilustración 22 Parcela en el predio de Los Planes.*

#### **4.2.11.1.2 Siembra**

La siembra se llevó a cabo manualmente el 17 de febrero de 2023 con la ayuda de un azadón. Se utilizó la variedad de semilla de maíz elotero A-7573 (se recomienda revisar la ficha técnica en Materia Vegetal para más detalles), depositado una por cada hueco (se recomienda revisar la ficha técnica en Materia Vegetal para más detalles). Se planificó un periodo de 3 meses para el crecimiento y desarrollo de la planta, con la cosecha programada para principios de junio del mismo año mencionado.

La Ilustración 32 exhibe el área delimitada con postes de bambú para facilitar la ubicación de cada tratamiento de fertilización. En cada zona, se sembraron 100 plantas de maíz, de las cuales se seleccionaron 10 para llevar a cabo el análisis estadístico.

#### 4.2.11.1.3 Análisis físico y fisicoquímico del suelo

Semanas antes de la siembra, se tomaron muestras de suelo de varios puntos a una profundidad de 30 cm, conforme a lo estipulado por la NOM-021-RECNAT-2000. Posteriormente, se enviaron al laboratorio de GisenaLabs, ubicado en Texcoco, Estado de México.

Según los resultados obtenidos, la zona presenta una buena disponibilidad de nitratos y potasio. Esto se atribuye al hecho de que el cultivo anterior, la papa, recibió una cantidad adecuada de estos nutrientes. Sin embargo, se observa una baja reserva de fósforo en el suelo. Además, el pH se encuentra en un rango fuertemente ácido, mientras que la capacidad de intercambio catiónico (CIC) es alta. Los detalles de estos resultados se muestran en la Tabla 32.

Propiedades químicas	pH	Nitratos (mg/kg)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	CIC (cmol/kg)
Valor	5.0	107.4	4.15	0.70	6
Clasificación (NOM-021-RE CNAT-200)	Fuertemente ácido	Muy Alto	Bajo	Alto	Alto

Tabla 32 Propiedades químicas del suelo: Los Planes.

#### 4.2.11.1.4 Manejo agronómico del suelo

La labor de limpieza del terreno fue realizada por los agricultores, quienes eliminaron la maleza de manera manual y con la asistencia de un azadón, aproximadamente cada 20 días. Debido al continuo crecimiento de la hierba, el productor optó por aplicar un herbicida para reducir su presencia.

#### 4.2.11.1.5 Tratamientos y fertilización

Basándonos en el análisis de suelo realizado, se identificó un terreno con baja disponibilidad de fósforo, un nivel elevado de potasio y una concentración muy alta de nitrógeno. Al introducir estos valores en el SE, se recomendó la aplicación de Triple 16 y DAP, como se muestra en la Ilustración 23.

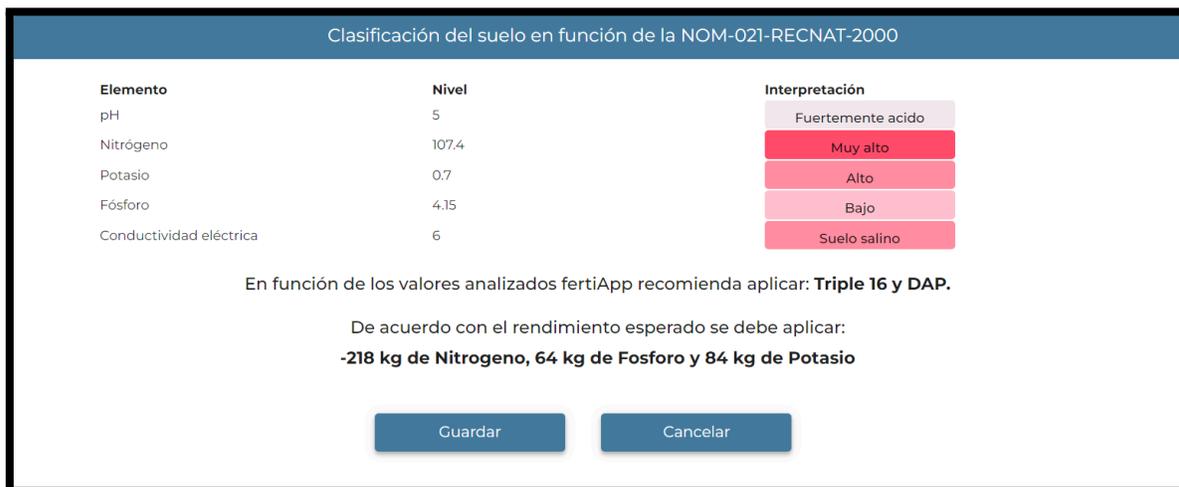


Ilustración 23 Sugerencia de esquema de fertilización predio Los Planes.

La aplicación de los esquemas de fertilización se dividió en dos, el primer abonado se dio el día 9 de febrero de 2023 y el segundo el 21 de abril de 2023, aplicando las cantidades de la Tabla 24.

Como se puede observar en la Tabla 33, el porcentaje de fertilizante aplicado entre el tratamiento B y C es prácticamente el doble. La recomendación del SE indica no aplicar nitrógeno, ya que el terreno cuenta con un buen abastecimiento. Sin embargo, el productor suministró 270 kg innecesarios de N. Se observa una situación similar con el fósforo, donde el agricultor destina casi el doble de lo sugerido por el software. En cuanto al potasio, el tratamiento B aplica 36 kg más que el C, y, además, se agregaron 20 kg de calcio. En la

sección de [Análisis estadístico](#), se profundizará qué tratamiento arroja los mejores resultados.

Tratamiento	Aplicación	Cantidad
A	N/A	0 kg
B	Urea, Nitrato de calcio y DAP	270 kg N; 105 kg P; 120 kg K; 20 kg Ca.
C	Triple 16 y DAP	64 kg de fósforo y 84 de potasio

*Tabla 33 Esquemas fertilización Los Planes: Tratamientos A, B y C.*

**Nota:** A= Testigo, B= Tratamiento tradicional y C= Sugerencia sistema experto.

#### **4.2.11.1.6 Análisis estadístico**

El análisis de varianza (ANOVA) posibilita la comparación de las medias entre tres o más grupos, permitiendo la identificación de posibles diferencias significativas entre ellos. Al establecer un nivel de significancia del 5%, se fija un umbral para determinar si una diferencia observada entre los conjuntos es estadísticamente relevante. Por lo tanto, las variables de estudio fueron sometidas a este procedimiento.

La elección de un nivel de error del 5% implica que se rechazan las hipótesis nulas si el valor p asociado es inferior a 0.05. En otras palabras, si el resultado de p es menor a 0.05, se considerará que hay evidencia estadística para afirmar que al menos una de las medias del conjunto es significativamente diferente al resto.

Es fundamental señalar que la utilización del nivel de significancia del 5% es una convención ampliamente aceptada, aunque también puede variar según el contexto del estudio y los criterios establecidos.

Para realizar esta técnica, inicialmente se recolectaron las mediciones de todas las variables de interés y se organizaron en un archivo de Excel. Luego, utilizando el software XLSTAT, se llevó a cabo el ANOVA para cada conjunto de datos

#### **4.2.11.1.6.1 Altura de la planta**

Conforme a investigaciones anteriores, el desarrollo de la planta de maíz se ve influido por diversos factores. Un componente crucial es la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Smith et al., 2018). La presencia de elementos esenciales, como nitrógeno, fósforo y potasio, desempeña un papel fundamental en el crecimiento y desarrollo de este cultivo (Jones & Johnson, 2016).

Adicionalmente a estos componentes, otro factor trascendental es la cantidad y distribución de la luz solar. La luz es indispensable para la fotosíntesis, un proceso vital en el cual las plantas transforman la energía solar en nutrientes (Smith & Brown, 2017). Los estudios han evidenciado que la intensidad y duración de la luz pueden afectar de manera significativa la altura del cultivo de maíz (González et al., 2019).

El agua también desempeña un papel crítico; su presencia incide directamente en la capacidad de las plantas para absorber nutrientes y mantener su turgencia (Johnson & Smith, 2020). Estudios han evidenciado que la sequía o el exceso de agua pueden restringir el crecimiento y la altura de las plantas de maíz (Robinson et al., 2018).

Otros factores que pueden influir en la altura de la planta son: temperatura, densidad de siembra y la genética de la variedad de maíz utilizada (Brown et al., 2019; García et al., 2021; White & Wilson, 2017). Estos elementos interactúan de manera compleja y pueden variar según las condiciones específicas del cultivo y el entorno.

La Tabla 25 presenta el resumen estadístico de la altura de las plantas después de 88 días desde la germinación. Durante los primeros 14 días, no se observaron diferencias significativas, ya que, en ese período aún no se había aplicado ningún químico. Este patrón se mantuvo a los 48 días, incluso después de la aplicación del abono Triple 16.

Es a partir del día 60 ddg cuando se evidencia una diferencia estadística entre los tres tratamientos. En este punto, el tratamiento C muestra la mayor altura promedio (177.6 cm), con una diferencia de 19.4 y 13.4 cm en comparación con los tratamientos B y A, respectivamente.

Tras la aplicación de DAP, que corresponde a la segunda etapa de fertilización, se observa una diferencia significativa entre los grupos de estudio. Asimismo, a los 88 días ddg, el tratamiento C logra la mayor altura con 241.6 cm, con una diferencia de 7.5 y 20.4 cm en comparación con los tratamientos B y A.

Según los resultados obtenidos, se puede afirmar de manera clara y evidente que existe una diferencia significativa en la altura de las plantas entre los grupos que recibieron el esquema sugerido por el SE, siguiendo una fertilización tradicional y aquellas que no.

En pocas palabras, el proceso de fertilización proporciona a las plantas de maíz los nutrientes esenciales necesarios para un crecimiento óptimo y saludable. Al suministrar fertilizantes que contienen elementos como nitrógeno, fósforo y potasio, se estimula el desarrollo de las raíces, el vigor de la planta y la producción de tejidos vegetales. Lo anterior se debe realizar en función a las necesidades del suelo, contemplando la cantidad, tipo y número de fertilizadas.

Los resultados obtenidos permiten afirmar de manera clara y evidente que existe una diferencia significativa en la altura de las plantas entre los grupos que siguieron el esquema sugerido por el SE, con fertilización tradicional, y aquellos que no recibieron.

En resumen, el proceso de abonado provee a las plantas de maíz los nutrientes esenciales y necesarios para un crecimiento óptimo y saludable. Al suministrar fertilizantes con elementos como nitrógeno, fósforo y potasio, se promueve el desarrollo de las raíces, el vigor de la planta y la producción de tejidos vegetales. Por lo que, este proceso debe ajustarse según las necesidades específicas del suelo, considerando la cantidad, tipo y frecuencia de los químicos aplicados.

Tratamientos	14 ddg	48 ddg	60 ddg	88 ddg
A	19.5	74.8	164.2	221.4
B	21.3	75.1	158.2	234.1
C	20.6	79.9	177.6	241.6
C.V. %	36.26	9.96	9.86	5.45
ANOVA	°	°	*	***
p-valor	0.869	0.252	0.020	0.0003

*Tabla 34 Resumen estadístico durante 88 ddg: altura de la planta predio Los Planes.*

**Nota:** ddg: días después de la germinación, A: testigo, B: esquema de fertilización tradicional empleado por el agricultor y C: esquema de fertilización sugerido por el SE.

La Ilustración 24 modela una representación gráfica del crecimiento de la planta de maíz en relación con los días transcurridos después de la germinación.

En el eje horizontal se encuentran los días posteriores a la germinación, lo que indica el tiempo que ha pasado desde que las semillas de maíz comenzaron a brotar y desarrollarse. A medida que avanzamos hacia la derecha en el eje horizontal, se indica el progreso cronológico desde el inicio de la germinación hasta un período posterior en el tiempo.

En el eje vertical se muestra el crecimiento de la planta de maíz. Puede estar representado mediante la altura de la planta. A medida que nos desplazamos hacia arriba en el eje vertical, se indica un mayor crecimiento de la planta.

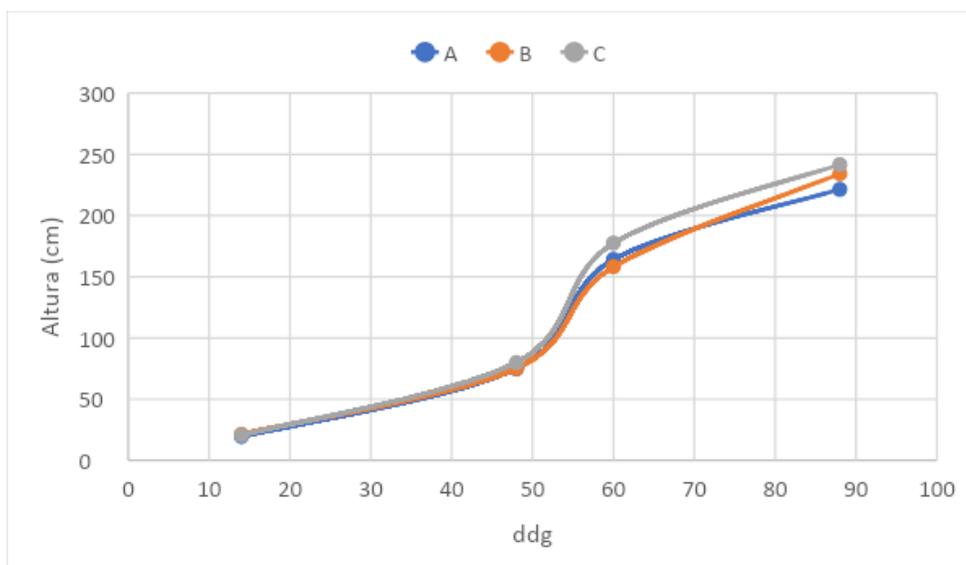


Ilustración 24 Altura de la planta durante 88 ddg predio Los Planes.

#### 4.2.11.1.6.2 Diámetro del tallo

El desarrollo y el diámetro del tallo de la planta de maíz están influenciados por diversos aspectos. Según Smith y Johnson (2018), uno de los principales factores que índice en el diámetro del tallo es el genotipo de la planta de maíz. Diferentes variedades de maíz poseen características genéticas distintas, lo que puede dar lugar a variaciones en el tamaño y la estructura del tallo.

Además del genotipo, el entorno en el que la planta crece también desempeña un papel crucial en su desarrollo. De acuerdo con estudios realizados por García et al. (2019), factores como la disponibilidad de agua, la temperatura, la radiación solar y la fertilidad del suelo pueden influir en el crecimiento y el diámetro del tallo. Por ejemplo, condiciones de estrés hídrico pueden resultar en un menor diámetro del tallo, mientras que un suministro adecuado de agua y nutrientes puede propiciar un mayor desarrollo.

La Tabla 26 presenta el resumen estadístico después de 88 días desde la germinación. En los primeros 14 ddg, no se observa una diferencia significativa, ya que en este período aún no se había aplicado ninguna etapa de fertilización. Tampoco se evidencia variación a los 48 ddg, ya que el valor de p es mayor a 0.05. Hasta este punto, ya se había realizado el

primer abonado con Triple 16, pero fue unos días antes de la toma de medida. Por lo tanto, el proceso de absorción de los químicos estaba aún en curso.

Es a partir del día 60 ddg cuando se registra una diferencia significativa, con un p-valor igual a 0.001. En el tratamiento C, se alcanza un diámetro de tallo promedio de 40.6 mm, 4.6 y 5.7 mm más grande en comparación con los tratamientos B y A, respectivamente. Después de aplicar la segunda etapa de abonado, a los 88 ddg, también se observa una disparidad notable. El diámetro más grande se encuentra en el tratamiento C con 41.3 mm, mientras que el más pequeño se registra en el tratamiento A con 35.9 mm.

Claramente existe una diferencia notable después del día 60, por lo que, aplicar esquemas de fertilización en función de las necesidades del terreno, influye directamente entre lograr un buen diámetro de tallo o no. Puesto que, un tallo más grueso y robusto proporciona mayor soporte estructural a la planta, lo que le permite resistir condiciones climáticas adversas, como vientos fuertes o lluvias intensas. Además, un eje ancho presenta una mayor capacidad para transportar nutrientes y agua desde las raíces hasta las hojas y las espigas, fomentando así un crecimiento saludable y una mayor producción de granos. Asimismo, un tallo de mayor diámetro puede brindar beneficios adicionales en términos de resistencia a enfermedades y plagas.

<b>Tratamientos</b>	<b>14 ddg</b>	<b>48 ddg</b>	<b>60 ddg</b>	<b>88 ddg</b>
A	4.4	15.6	34.9	35.9
B	3.6	15.9	36	36.1
C	<b>4.4</b>	<b>16</b>	<b>40.6</b>	<b>41.3</b>
C.V. %	34.06	7.79	10.46	10.81
ANOVA	◦	◦	***	***
p-valor	0.353	0.765	0.001	0.001

*Tabla 35 Resumen estadístico durante 88 ddg: diámetro del tallo (mm).*

La Ilustración 25 muestra el crecimiento del tallo, y hasta el día 40 ddg, el diámetro de los tres tratamientos se mantiene constante. A partir del día 55, el tratamiento C comienza a destacar del resto y continúa creciendo hasta el día 88. Por el contrario, los tratamientos A y B mantienen un desarrollo similar durante este período.

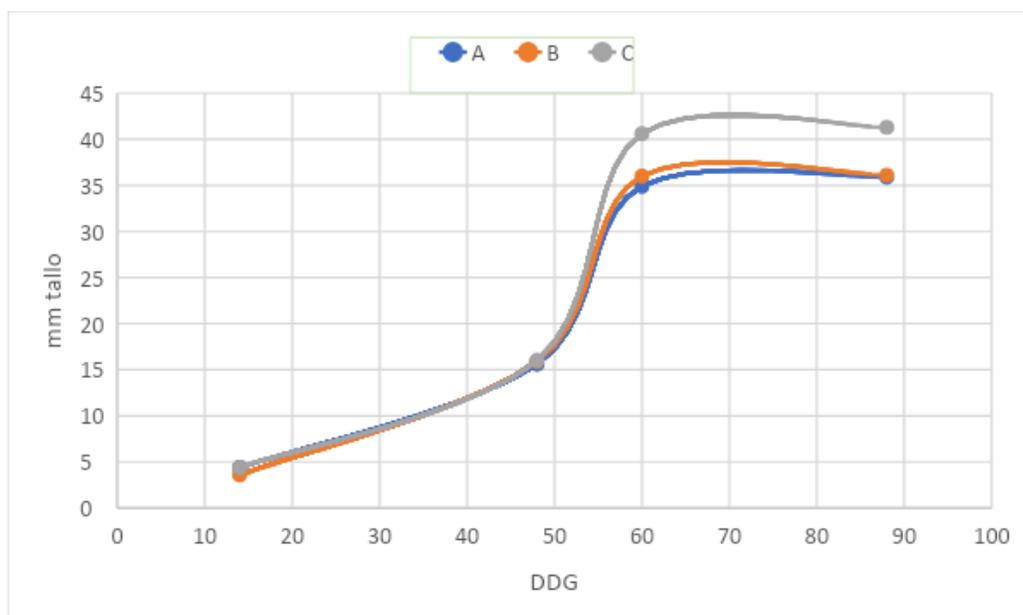


Ilustración 25 Diámetro del tallo durante 88 ddg.

#### 4.2.11.1.6.3 Diámetro del elote

El desarrollo del diámetro del elote está determinado por la variedad de maíz cultivada, las condiciones ambientales, el manejo agronómico y las prácticas de fertilización. La selección de la variedad adecuada, el suministro equilibrado de agua, las prácticas de manejo agronómico y la aplicación adecuada de nutrientes son factores clave para obtener mazorcas de mayor tamaño.

Según los datos presentados en la Tabla 36, el valor de p indica que hay una diferencia significativa entre los tres grupos, con un diámetro promedio por elote de 52.1 mm en el tratamiento C. Esta cifra representa una diferencia de 9 y 7.7 mm más en comparación con los tratamientos A y B, respectivamente.

Por lo que, al fertilizar en función de las necesidades del suelo y en la cantidad apropiada, se obtienen grandes ganancias en cuanto al tamaño del diámetro. Incluso cuando el productor suministra más del doble de químico, su esquema de fertilización se asemeja mucho al testigo y es considerablemente inferior al del SE.

<b>Tratamiento</b>	
A	43.1
B	44.4
C	52.1
C.V. %	10.45
ANOVA	***
p-valor	0.0001

*Tabla 36 Resumen estadístico durante 88 ddc: diámetro del elote (mm).*

#### **4.2.11.1.6.4 Largo del elote**

Las condiciones ambientales desempeñan un papel crucial en el progreso del elote. La disponibilidad de nutrientes, la temperatura, la humedad y la radiación solar pueden impactar en el crecimiento y la elongación de los granos de maíz. Estudios como el de García et al. (2019), han confirmado que una adecuada fertilización y un suministro de agua óptimo favorecen el desarrollo de elotes más largos.

En definitiva, el desarrollo del elote está influenciado por diversos aspectos, que abarcan aspectos genéticos y condiciones ambientales. La comprensión de estos mecanismos y factores es esencial para mejorar el rendimiento y lograr productos de mayor tamaño.

Según los resultados de la Tabla 37, el valor de p indica que no hay una diferencia significativa entre los tres tratamientos (p-valor > 0.05). En promedio, la longitud del

producto varía de 22.95 a 24.6 cm. Incluso el exceso de fertilización suministrado por el productor no generó un mayor rendimiento, lo que sugiere que, de continuar esta tendencia, podría afectar negativamente las condiciones del suelo y del cultivo, resultando en posibles pérdidas monetarias significativas.

<b>Tratamiento</b>	
A	22.95
B	23.6
C	24.6
C.V. %	6.93
ANOVA	.
p-valor	0.073

*Tabla 37 Resumen estadístico durante 88 ddg: largo del elote (cm).*

#### **4.2.11.1.6.5 Número de granos por hilera**

El número de granos por hilera en el elote son determinados por una combinación de factores genéticos y ambientales. Estos interactúan para influir en el proceso de formación y crecimiento de los granos, y su importancia puede variar según la especie y la variedad de la planta.

La genética desempeña un papel fundamental en el desarrollo y la cantidad de granos por hilera. Los genes que controlan la formación de flores, polinización y fertilización son cruciales para determinar la cantidad de granos que se desarrollarán en una hilera. Estos genes pueden influir en la producción de hormonas vegetales y en la disponibilidad de nutrientes, afectando así el número de granos que se formarán.

Además de los factores genéticos, el entorno también ejerce influencia en el desarrollo y la cantidad de granos por hilera. El clima, la disponibilidad de agua y nutrientes, la intensidad

y duración de la radiación solar, así como los factores bióticos como la presencia de enfermedades y plagas, pueden afectar el desarrollo de estos.

Los resultados presentados en la Tabla 38 son muy interesantes. En primer lugar, se observa una diferencia significativa entre los tres grupos ( $p$ -valor = 0.0002). Segundo, el número de granos por hilera en el tratamiento A (testigo) fue superior al del B (fertilización tradicional). Es decir, aunque no se aplicó fertilizante, el sector A presenta mayores rendimientos. Finalmente, la sección C mostró el mejor estadístico con un promedio de 40.2 granos.

En gran medida, esto se atribuye a la presencia de árboles de gran tamaño en el borde de la parcela, los cuales generan sombra en ciertas horas del día. Como se demostró, la radiación solar tiene una influencia significativa en el número de granos presentes en el elote.

<b>Tratamiento</b>	
A	39
B	30.4
C	40.2
C.V. %	17.87
ANOVA	***
p-valor	0.0002

*Tabla 38 Resumen estadístico durante 88 ddg: número de grano por hilera.*

#### **4.2.11.1.6.6 Granos totales**

El número total de granos en el elote es resultado de una compleja interacción entre factores genéticos, ambientales y de manejo agronómico. La genética de la planta determina la capacidad de proliferación y diferenciación celular, mientras que las condiciones ambientales, como el agua, la temperatura y la radiación solar, afectan la

fertilidad y la formación de los granos. Además, prácticas de manejo adecuadas, como la densidad de siembra y la nutrición balanceada, pueden optimizar la producción de granos en el elote.

En este contexto y acorde a los datos de la Tabla 39, se observa una diferencia significativa entre los tres grupos (p-valor = 0.0004). El tratamiento C exhibe el mayor número de granos con 656; sorprendentemente, la sección A ocupa el segundo lugar con 594.9, superando al tratamiento B. Es decir, sin aplicar abono químico, el sector A logró más granos totales que el B, a pesar de que a este último se le suministró el doble de lo sugerido por el SE.

Indudablemente, el tratamiento C obtuvo resultados estadísticos superiores. Esto subraya la importancia de proporcionar nutrientes en función de las necesidades específicas del terreno, lo que conduce a una mejora significativa en el número total de granos por elote.

<b>Tratamiento</b>	
A	594.9
B	451.7
C	656
C.V. %	23.22
ANOVA	***
p-valor	0.0004

*Tabla 39 Resumen estadístico durante 88 ddc: granos totales.*

#### 4.2.11.1.6.7 Peso del grano

Como es de esperarse, el peso total del grano está influenciado por los análisis previos. Los datos de la Tabla 40 muestran una diferencia significativa entre los tratamientos (p-valor = 0.0001). La sección C obtuvo el mejor estadístico promedio con 113.3 gramos, superando en 29.6 y 61.6 gramos a los tratamientos A y B, respectivamente. Al igual que en secciones anteriores, el tratamiento A presenta números superiores a los del B. Por lo tanto, aplicar el doble de abono resultó inferior a no aplicar químicos.

Es importante destacar que la radiación solar afecta el número total de granos, su peso, entre otros factores. Considerando la parcela de experimento, en los bordes se encuentran árboles de gran tamaño que generan sombra en ciertas horas del día. Por ende, este factor podría haber influido en el número de granos por hilera, el total y su peso.

<b>Tratamiento</b>	
A	83.7
B	51.7
C	113.3
C.V. %	39.93
ANOVA	***
p-valor	0.0001

*Tabla 40 Resumen estadístico durante 88 ddg: peso total del grano.*

#### 4.2.11.1.6.8 Peso del elote

El peso del elote claramente se ve afectado por los análisis estadísticos anteriores. Los datos de la Tabla 41 indican una diferencia significativa entre los tratamientos (p-valor = 0.0001). El grupo C mostró el mejor promedio con 311.9 gramos, seguido por A y B. Estos

últimos dos presentan una similitud considerable; por lo tanto, no hay una gran diferencia entre la fertilización tradicional y no aplicar químicos.

La disparidad es evidente al realizar la fertilización considerando los requerimientos del suelo, lo que resulta en un mayor número de granos por hilera y en total, repercutiendo directamente en el peso total del elote.

<b>Tratamiento</b>	
A	234.5
B	232.8
C	311.9
C.V. %	20.48
ANOVA	***
p-valor	0.0001

*Tabla 41 Resumen estadístico durante 88 ddg: peso del elote.*

## **4.2.11.2 Chapultepec**

### **4.2.11.2.1 Ubicación**

Chapultepec se encuentra a una altitud de 1565 metros, a 2.9 kilómetros al sur de dicho municipio. En esta ubicación se llevaron a cabo pruebas con dos tratamientos de fertilización y un grupo de control. La superficie de la parcela es completamente plana, como se muestra en la Ilustración 26, cubriendo una extensión de una hectárea y utilizando un área experimental total de 520 metros cuadrados.



*Ilustración 26 Parcela en el predio de Chapultepec*

#### **4.2.11.2.2 Siembra**

El proceso de siembra se llevó a cabo el 17 de febrero de 2023 con la ayuda de un azadón. Al igual que en Los Planes, se colocó una semilla de maíz elotero A-7573 por hoyo. Se estableció un período de 3 meses para el desarrollo de la planta, durante el cual se realizaron diversas mediciones.

La Ilustración 27 muestra el área designada, la cual está delimitada por bambúes para facilitar la identificación de cada tratamiento. En cada zona se sembraron 100 plantas de maíz, de las cuales se seleccionaron 10 para su posterior análisis.



*Ilustración 27 Parcela en el predio de Chapultepec*

#### **4.2.11.2.3 Análisis físico y fisicoquímico del suelo**

Al igual que en el predio anterior y antes de la siembra, se tomaron muestras del suelo de diversas zonas a una profundidad de 30 cm, conforme a lo estipulado por la NOM-021-RECNAT-2000. Posteriormente, estas muestras fueron enviadas a Gisenalabs para su análisis correspondiente.

De acuerdo con los resultados proporcionados por el laboratorio, la parcela presenta deficiencias significativas en fósforo y potasio, además de un nivel medio en nitratos. Se

requiere atención inmediata para equilibrar estos tres nutrientes, ya que son de suma importancia en el cultivo de maíz. Este terreno muestra un desequilibrio considerable a comparación del anterior.

En tanto el pH y el CIC se encuentran en rangos: moderadamente ácido y bajo respectivamente. Los resultados se aprecian en la Tabla 42.

Propiedades químicas	pH	Nitratos (mg/kg)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	CIC (cmol/kg)
Valor	5.82	24.1	1.42	0.19	0.15
Clasificación (NOM-021-RE CNAT-200)	Moderadamente ácido	Medio	Bajo	Muy bajo	Salinidad despreciable

*Tabla 42 Resumen estadístico durante 88 ddg: peso del elote.*

#### **4.2.11.2.4 Manejo agronómico del suelo**

La limpieza del terreno corrió a cargo de los productores, removiendo la maleza manualmente y con ayuda del azadón, aproximadamente cada 15 o 20 días.

#### **4.2.11.2.5 Tratamientos y fertilización**

En función del estudio de suelo, se encontró con un terreno con alta disponibilidad de nutrientes. Al momento de ingresar los valores al SE, sugirió una aplicación de Urea y Nutri Wunder (Ilustración 28).

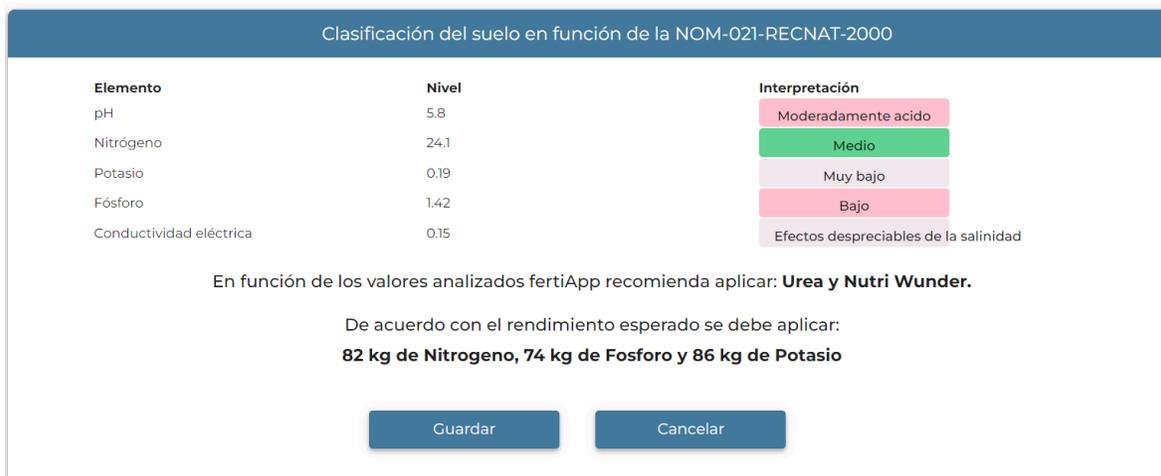


Ilustración 28 Esquema de fertilización: La Ventana.

La aplicación de los esquemas de fertilización se dividió en dos etapas. El primer abonado se realizó el 9 de febrero de 2023, y el segundo el 21 de abril de 2023, aplicando las siguientes cantidades:

Tratamiento	Aplicación	Cantidad
A	N/A	
B		200 kg N; 180 kg P; 90 kg K.
C	Urea y Nutri Wunder	82 kg N; 74 kg P; 86 kg K.

Tabla 43 Esquemas fertilización Chapultepec: Tratamientos A, B y C.

**Nota:** A= Testigo, B= Tratamiento tradicional y C= Sugerencia sistema experto.

#### 4.2.11.2.6 Análisis estadístico

##### 4.2.11.2.6.1 Altura de la planta

El análisis de varianza en la altura de las plantas indicó que en el día 14 existe una diferencia significativa entre los tratamientos. El grupo B alcanzó la altura promedio más alta, con 12.78 cm, seguido por los grupos A y B. Sin embargo, en la segunda medición (48 días después de la germinación), no se observaron diferencias significativas, con un valor p de 0.156. Esta tendencia se mantuvo hasta el día 60, donde tampoco se alcanzó una

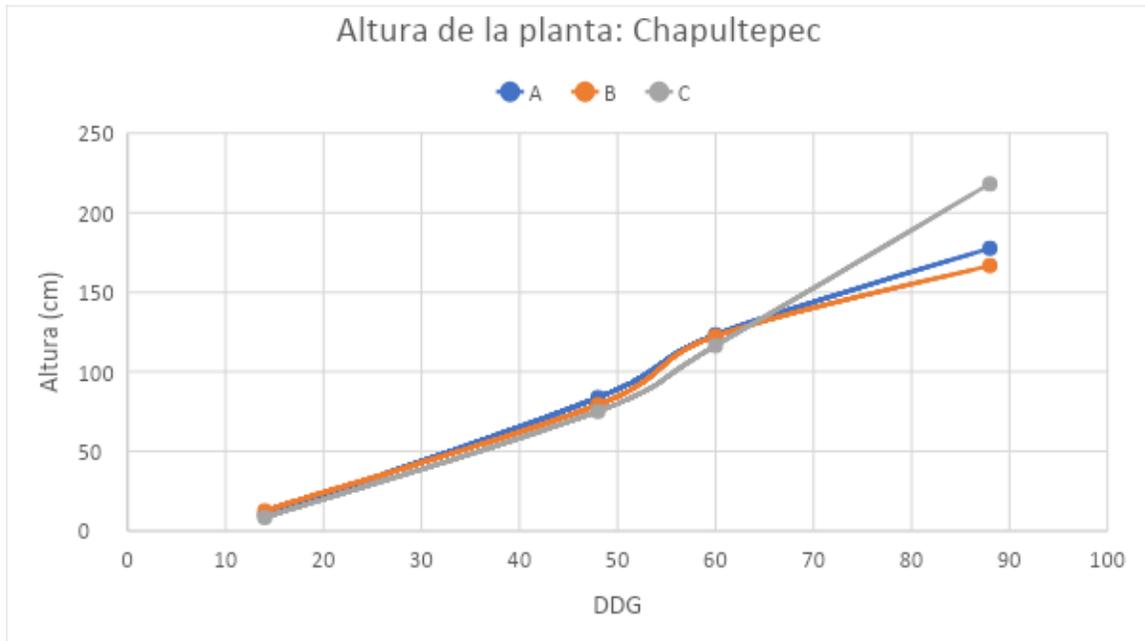
disparidad importante (p-valor = 0.279), con alturas promedio entre 116.5 y 123.4 cm. Fue hasta la última medición registrada cuando se estableció una diferencia significativa, con una altura de 218.1 cm en el tratamiento C, lo que representa 40.5 y 51.3 cm más que los tratamientos A y B, respectivamente.

En este sentido, la aplicación efectuada por el agricultor cada 8 días desde la germinación y hasta unas semanas antes de la cosecha no son de gran ayuda, dado que, en la altura de la planta, este químico no se ve reflejado e incluso es menor al del tratamiento C, el cual únicamente recibió dos etapas de fertilización. El excedente únicamente está degradando las condiciones fisicoquímicas del terreno.

<b>Tratamientos</b>	<b>14 ddg</b>	<b>48 ddg</b>	<b>60 ddg</b>	<b>88 ddg</b>
A	10.04	83.8	123.4	177.6
B	12.78	79.2	122.5	166.8
C	8.44	75.2	116.5	218.1
C.V. %	25.59	9.97	8.59	13.44
ANOVA	***	o	o	***
p-valor	0.0002	0.156	0.279	0.0001

*Tabla 44 Resumen estadístico durante 88 ddg: altura de la planta predio Chapultepec.*

La Ilustración 29 muestra que desde el día 14 hasta el 60, el crecimiento entre los tres tratamientos es muy similar, y a partir de 68 ddg, el grupo C comienza a destacarse del resto. Por su parte y prácticamente desde el inicio de la germinación los grupos A y B son muy semejantes.



*Ilustración 29 Altura de la planta durante 88 ddg predio Chapultepec.*

#### **4.2.11.2.6.2 Diámetro del tallo**

A diferencia del análisis anterior, en este resumen estadístico, no existe diferencia significativa entre ninguna medición registrada. El valor de los mismos es muy similar entre sí. Aun cuando el productor aplicó exceso de fertilizante no se ve reflejado en los números (Tratamiento B).

Los datos del tratamiento C son parecidos al lote B, por lo que, el esquema sugerido por el SE es un gran ejemplo, del porqué se deben tomar en cuenta las necesidades de la parcela; abonando lo necesario se logran buenos resultados.

Por las propias condiciones del terreno se presentan ligeras elevaciones y/o hundimientos, lo que da paso a acumulaciones de nutrientes en ciertas zonas. Esto se refleja claramente en la zona del tratamiento A, donde, a pesar de no aplicar fertilizante, se alcanzaron buenos números en el diámetro del tallo, datos similares a los del lote C en la última medición del día 88.

Tratamientos	14 ddg	48 ddg	60 ddg	88 ddg
A	3.4	16.5	28.6	33.7
B	3.6	17	31	31.9
C	3.2	16.4	30.4	33.8
C.V. %	18.28	6.6	11.74	12.63
ANOVA	°	°	°	°
p-valor	0.368	0.439	0.294	0.537

Tabla 45 Resumen estadístico durante 88 ddg: diámetro del tallo predio Chapultepec.

La Ilustración 30 muestra el crecimiento del tallo durante 88 días, y claramente su desarrollo desde la primera medición hasta la última es muy similar. Por lo tanto, como se mostró en el resumen estadístico, no existe una diferencia notoria entre ningún tratamiento.

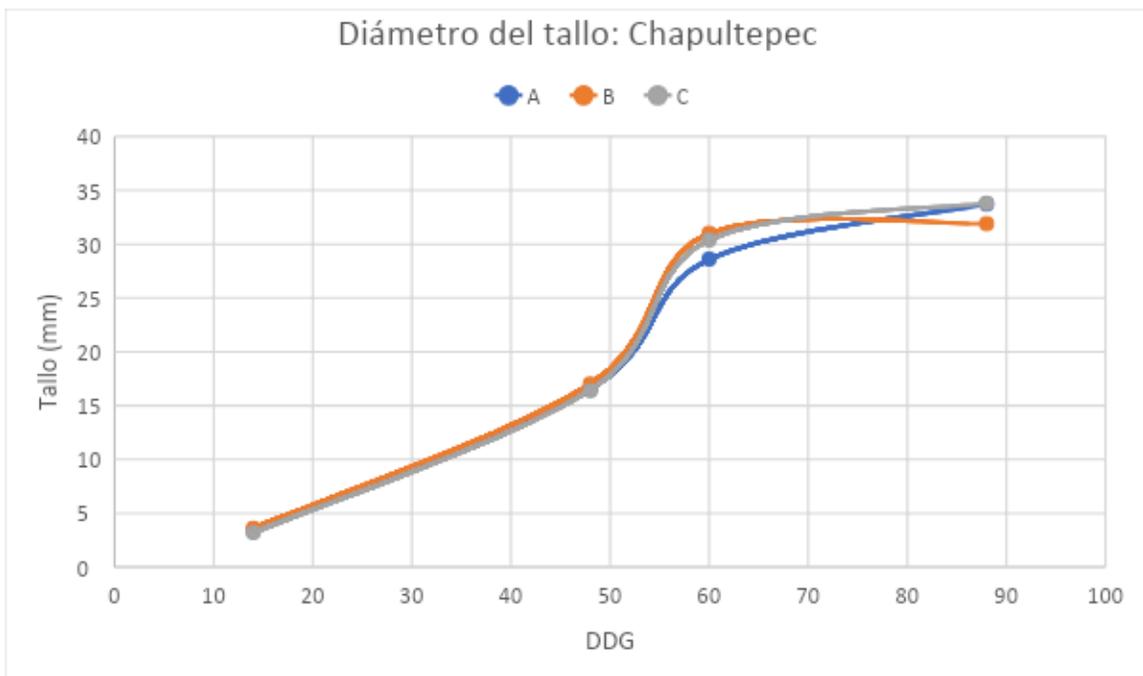


Ilustración 30 Diámetro del tallo durante 88 ddg predio Chapultepec.

#### 4.2.11.2.6.3 Diámetro del elote

A diferencia del análisis anterior, esta evaluación sí muestra diferencias significativas. El diámetro más grande se observa en el grupo C, con 52.75 mm, seguido por el B (38 mm) y el A (31.25 mm). La aplicación de Urea y Nutri Wunder en la dosis recomendada por el SE se refleja en un buen grosor del elote, logrando una diferencia de 14.75 mm en comparación con el tratamiento B. Sin embargo, la fórmula proporcionada por el productor no generó una disparidad notable en relación al grupo C; incluso, el exceso, no produjo resultados favorables. Únicamente se obtuvo una diferencia de 6.75 mm con el tratamiento A.

Tratamiento	
A	31.25
B	38
C	52.75
C.V. %	23.99
ANOVA	***
p-valor	0.0001

Tabla 46 Resumen estadístico durante 88 ddg: diámetro del elote predio Chapultepec.

#### 4.2.11.2.6.4 Largo del elote

Con base en los resultados de la Tabla 45, se observa una mínima diferencia significativa entre los tres tratamientos (valor  $p = 0.049$ ). El grupo C mostró el mejor promedio con 24.25 cm, seguido del A y B.

Resulta sorprendente que el tratamiento A alcanzó un tamaño mayor que el B, con una diferencia de 1.25 cm. Por consiguiente, parece que el exceso de fertilizante aplicado en el

lote B no tuvo ningún efecto. Esto plantea dudas significativas al productor respecto a la práctica de abonado que está empleando y la cantidad de dinero que está invirtiendo.

Es posible que las disparidades observadas se deban al estado del terreno, ya que existen elevaciones o hundimientos en ciertas zonas que podrían afectar ligeramente el análisis. Esto se evidencia en los resultados del tratamiento B, el cual mostró los estadísticos más bajos.

<b>Tratamiento</b>	
A	20
B	18.75
C	24.25
C.V. %	16.74
ANOVA	*
p-valor	0.049

*Tabla 47 Resumen estadístico durante 88 ddg: largo del lote predio Chapultepec.*

#### **4.2.11.2.6.5 Número de granos por hilera**

Sin duda, el tratamiento C sigue destacándose del resto. En esta ocasión, el lote C logró 38.75 granos por hilera, el B obtuvo 28.75 y el A 24.25.

Por lo que, suministrar una dosis de fertilizante adaptada a las necesidades del suelo se refleja en un mayor número de granos por hilera. Ni siquiera el exceso de químicos aplicado en el tratamiento B proporcionó resultados satisfactorios. Hasta el momento, solo ha generado pérdidas monetarias al productor.

<b>Tratamiento</b>	
A	24.25
B	28.75
C	38.75
C.V. %	22.50
ANOVA	***
p-valor	0.0002

*Tabla 48 Resumen estadístico durante 88 ddg: número de granos por hilera predio Chapultepec.*

#### **4.2.11.2.6.5 Granos totales**

Como era de esperar y en función del análisis del número de granos por hilera, expuesto en el apartado anterior, el tratamiento C alcanzó el mayor número de granos totales con 556, seguido del tratamiento B y A, con 448.75 y 330, respectivamente. Por lo tanto, al aplicar una dosis de fertilizante basada en las necesidades del suelo, los resultados se reflejan en un buen número de granos por hilera y totales.

<b>Tratamiento</b>	
A	330
B	448.75
C	556
C.V. %	26.31
ANOVA	**
p-valor	0.006

*Tabla 49 Resumen estadístico durante 88 ddg: número de granos totales predio Chapultepec.*

#### 4.2.11.2.6.6 Peso del grano

Aunque en el análisis previo el tratamiento B mostró un mayor número total de granos en comparación con el lote A, al pesarlos sorprendentemente su peso es casi idéntico, con una diferencia mínima de 0.25 gramos. Claramente, existe una disparidad significativa; el grupo C obtuvo el mejor resultado con un total de 116 gramos. En este cotejo sí se reflejan los datos de la evaluación previa.

El peso total del grano dependerá de su maduración. No basta con tener una buena cantidad de granos; lo crucial es su llenado y su masa.

Tratamiento	
A	57.5
B	57.75
C	116
C.V. %	41.12
ANOVA	***
p-valor	0.0004

*Tabla 50 Resumen estadístico durante 88 ddg: peso total del grano predio Chapultepec.*

#### 4.2.10.2.6.7 Peso del elote

Evidentemente, el peso del elote está influenciado por los análisis anteriores, como era de esperar, existe una diferencia significativa con un valor p de 0.0003. El tratamiento C obtuvo la mayor masa promedio con 298 gramos, seguido del lote B (186.25 gramos) y A (151.75 gramos).

El hecho de aplicar abono foliar cada 8 días no representa un cambio notorio en comparación con suministrar lo que realmente requiere el suelo. Incluso el lote C logró un peso superior, con 111.75 y 146 gramos más que el tratamiento B y A, respectivamente.

<b>Tratamiento</b>	
A	151.75
B	186.25
C	298
C.V. %	41.12
ANOVA	***
p-valor	0.0003

*Tabla 51 Resumen estadístico durante 88 ddg: peso del elote predio Chapultepec.*

En resumen, aplicar un esquema de fertilización en función de las necesidades del suelo es de vital importancia en cada etapa fenológica del maíz. Un ligero desbalance podría afectar el resto del desarrollo.

Como se observó en los análisis de Chapultepec y Los Planes, las cantidades sugeridas por el SE mostraron buenos resultados, lo cual se ve reflejado en la altura del elote, número de granos por hilera y totales, así como en el peso del mismo. De igual forma se demostró que el exceso de fertilizante no es de mucha ayuda, únicamente se hace un gasto innecesario, el cual podría ser una inversión para un análisis de suelo.

### **4.3 Variables evaluadas: Comparación de resultados**

Durante el crecimiento del cultivo se evaluaron las siguientes características a los 14, 35, 48 y 60 días después de la germinación, tomando 10 plantas al azar por tratamiento.

#### 4.3.1 Durante el crecimiento

- Altura de la planta (cm): se midió la altura de la planta, desde el nivel de la superficie del suelo con ayuda de una cinta métrica.
- Diámetro del tallo (cm): El diámetro del tallo se midió a 5 cm del suelo con el apoyo de un calibre.

#### 4.4.2 A la cosecha

De las 10 plantas seleccionadas se cosecharon 20 mazorcas al azar por tratamiento con el objetivo de determinar el número de granos por hilera y por elote y el peso del mismo.

- Número de granos por hilera: se eligió una hilera y se contó el total.
- Granos totales: se multiplicó el total de hilera por el número de granos.
- Peso del grano: se desgranó el elote y se pesó en una báscula.
- Largo de elote: se midió en cm con ayuda de un flexómetro.
- Diámetro del elote: se midió en cm el diámetro del mismo con ayuda un vernier.
- Peso del elote: se pesó en una báscula cada uno de los elotes expresado en kg.

### 4.4 Métricas para evaluar el algoritmo

A raíz del análisis del estado del arte, la mayoría de los estudios simulan los sistemas con casos de prueba, contrastan las predicciones del software con las de un especialista o evalúan el algoritmo de recomendación. Sin embargo, en ningún momento mencionan las técnicas o procedimientos que realizaron para llegar a dichas conclusiones. Por lo tanto, este software es analizado con las métricas de evaluación para algoritmos de inteligencia artificial descritas en: Métricas para evaluar sistemas expertos.

En este sentido y con la evaluación de las distintas métricas permitirá identificar problemas o sesgos, determinar qué métrica obtiene el menor y mayor puntaje, para finalmente y en dado caso de requerirse, optimizar las sugerencias del mismo.

Para ello, se realizó un cuestionario con 10 escenarios, el cual fue aplicado tanto al software como a 3 ingenieros agrónomos.

#### 4.4.1 Cuestionario

Con base en las muestras enviadas a GisenaLabs, se decidió establecer un caso base para comparar los resultados del laboratorio con los del Sistema Experto (SE). Los demás escenarios fueron generados aleatoriamente y evaluados por el ingeniero agrónomo, quien decidió su aceptación o rechazo. Al mismo tiempo, los datos se introducían en el software para verificar su veracidad.

En seguida se muestran 3 de los 10 escenarios, para consultar el cuestionario completo acudir a Anexos, Cuestionario: Evaluación de métricas.

##### Escenario 1:

Macronutriente	Nivel
Nitrógeno	Muy alto
Fósforo	Bajo
Potasio	Alto
<b>RECOMENDACIÓN: TRIPLE 16 Y DAP</b>	
Aceptar	Rechazar

Tabla 52 Escenario 1. Evaluación de métricas.

**Caso 2:**

Macronutriente	Nivel
Nitrógeno	Muy alto
Fósforo	Alto
Potasio	Medio
<b>RECOMENDACIÓN: TRIPLE 16</b>	
Aceptar	Rechazar

*Tabla 53 Escenario 2. Evaluación de métricas.*

**Caso 3:**

Macronutriente	Nivel
Nitrógeno	Medio
Fósforo	Bajo
Potasio	Alto
<b>RECOMENDACIÓN: UREA Y DAP</b>	
Aceptar	Rechazar

*Tabla 54 Escenario 3. Evaluación de métricas.*

## 4.4.2 Resultados: métricas de evaluación

Después de aplicar el cuestionario a 3 ingenieros agrónomos, de los 3 usuarios, una vez se rechazó el escenario 9, dos veces el 8, y en este último, uno de ellos sugirió la aplicación de Triple 16 en lugar de Nutri Wunder.

	Predicción		
	Positivo	Negativo	Total
Positivo	24 (VP)	3 (FP)	<b>27</b>
Negativo	3 (FN)	0 (VN)	<b>3</b>
Total	<b>27</b>	<b>3</b>	<b>30</b>

*Tabla 55 Matriz de confusión: Resultados SE.*

En función de los datos obtenidos, estos se agruparon en una matriz de confusión para determinar el total de verdaderos positivos y negativos, así como los falsos positivos y negativos. La tabla 55 muestra la agrupación de los antes mencionados.

De los 30 escenarios evaluados, 24 resultaron verdaderos positivos, es decir, tanto el sistema como el agrónomo aceptaron la recomendación de fertilizante. Logrando 3 verdaderos negativos, donde tanto el software como el usuario rechazaron dicha sugerencia. Finalmente, se registraron 3 falsos negativos, cuando el SE sugirió una recomendación de químico, pero el encuestado la rechazó totalmente. A partir de estos datos, se obtuvieron las siguientes métricas de evaluación:

### 4.4.2.1 Exactitud

La exactitud cuantifica los casos positivos correctamente evaluados entre el total de predicciones realizadas. Según los resultados de la matriz de confusión y la fórmula correspondiente, el sistema muestra una exactitud del 80%.

Con respecto a los resultados del análisis del estado del arte, la mayoría de las investigaciones presentan estadísticas en el rango del 70 al 90%. Por lo tanto, el SE desarrollado se encuentra en un buen intervalo. Es importante destacar que esta es la primera versión del sistema, y los datos recopilados en las parcelas de Los Planes y Chapultepec respaldan el porcentaje alcanzado.

$$Exactitud = \frac{VP+VN}{VP+FP+FN+VN} = \frac{24+0}{24+3+3+0} = 0.8 = 80\%$$

#### 4.4.2.2 Precisión

En términos simples, la precisión mide el porcentaje total de predicciones correctas hechas por el algoritmo; un mayor coeficiente minimiza los falsos positivos. Siguiendo la fórmula propuesta, el sistema muestra una precisión del 88%, es decir, del total de casos evaluados, únicamente erró en el 12%.

$$Precisión = \frac{VP}{VP+FP} = \frac{24}{24+3} = 0.88 = 88\%$$

Con el buen resultado obtenido y los datos del segundo experimento, resulta muy favorable la implementación del mismo, ya que, en el predio de Los Planes, en los estadísticos de la altura de la planta, diámetro del tallo y del elote, se observaron diferencias significativas con respecto a los demás tratamientos. De igual forma, esto fue evidente en la parcela de Chapultepec.

La precisión del 88% puede aumentar la confianza de los agricultores en las recomendaciones del sistema, lo que podría traducirse en una mayor adopción de las prácticas sugeridas.

#### 4.4.2.3 Sensibilidad

Esta métrica busca evaluar la capacidad del modelo para identificar casos positivos entre el conjunto de datos. Una sensibilidad elevada destaca que el algoritmo es confiable para reconocer instancias positivas, mientras que un menor número indica lo contrario.

$$\text{Sensibilidad} = \frac{VP}{VP+FN} = \frac{24}{24+3} = 0.88 = 88\%$$

En términos generales, de los 30 escenarios propuestos, el algoritmo logró identificar de manera positiva el 88%. Esto implica que la mayor parte de las recomendaciones de fertilizantes fueron acertadas, lo que puede conducir a un uso más eficiente de los recursos.

#### 4.4.2.4 F1 Score

El sector agrícola resulta de vital importancia en el suministro alimenticio de la sociedad. Contar con el respaldo de un algoritmo que tenga un promedio positivo en la métrica de precisión y sensibilidad minimizará recomendaciones erróneas de fertilizante, pérdidas de cultivos y económicas.

$$F1 = \frac{2 * \text{Precisión} * \text{Sensibilidad}}{\text{Precisión} + \text{sensibilidad}} = \frac{2 * 0.88 * 0.88}{0.88 + 0.88} = 0.88 = 88\%$$

Al calcular el F1 Score del SE, se obtiene un puntaje del 88%, indicando que el algoritmo logra un buen equilibrio entre la precisión y la sensibilidad.

En resumen y después de aplicar un cuestionario a 3 ingenieros agrónomos, el SE muestra resultados positivos en varias métricas de evaluación, como la precisión, la sensibilidad y el F1 Score, con puntajes entre el 80 y 88%. Esto sugiere un buen rendimiento en la identificación de casos positivos y la minimización de errores. La exactitud del 80% se encuentra en un rango aceptable según comparaciones con estadísticas de investigaciones similares, respaldando la eficacia del SE en esta primera versión.

Por lo tanto, la implementación del SE resulta favorable, ya que en el predio de Los Planes y Chapultepec se observaron diferencias significativas en los estadísticos de la altura de la planta, diámetro del tallo y del elote en comparación con otros tratamientos.

A pesar de los buenos resultados, se registran 3 falsos negativos, indicando que en ciertos casos el SE sugirió un fertilizante que fue rechazado por el usuario. Esto podría tener implicaciones en la eficacia práctica del sistema. Asimismo, la evaluación se basa en un número limitado de 30 escenarios y la opinión de 3 ingenieros agrónomos. Una muestra más grande podría proporcionar una evaluación más robusta y representativa.

## 5 Conclusiones

Sin lugar a duda, el sector de las ciencias computacionales en el ámbito agrícola es de suma importancia, desde el análisis del suelo, elección de las semillas a sembrar e incluso el hecho del que el producto esté al alcance del consumidor.

Tan solo para el año 2050 se espera que la población mundial alcance los 9,700 millones de habitantes, lo que implica un aumento en la demanda de alimentos, incluyendo el cultivo de maíz. Agregando que este cereal es la base de cientos de alimentos, por lo que, se requerirá la innovación y mejora en los diferentes procesos que lo rodean.

Por lo que, emplear sistemas inteligentes para mejorar la toma de decisiones son de gran relevancia en pequeños y medianos productores, siendo ellos los más rezagados en este ámbito tecnológico. Aun cuando el avance va mejorando año tras año, hacer llegar estas herramientas tiende a ser complicado, e incluso algunas veces son rechazadas por el hecho de seguir empleando métodos empíricos que son transmitidos de generación en generación.

En este sentido los sistemas expertos que parten de una rama de la inteligencia artificial tienen como propósito sistematizar el conocimiento y razonamiento de un experto en el área, bajo tres claves: son de fácil acceso, proporciona recomendaciones iguales a las de un versado en el área, mejoran la productividad y por ende reducen costos de producción.

Tomando en cuenta lo citado anteriormente y ante la problemática que existe en el municipio de Coacoatzintla, y sumando que hasta la fecha en el estado de Veracruz no existe un conjunto de datos en el análisis de suelo se optó por el desarrollo de un sistema experto para la recomendación de fertilizantes en el cultivo de maíz, apoyándose de la literatura e ingenieros agrónomos especialistas en el tema.

Al no contar con este conjunto de datos se optó por recabar información esencial en el desarrollo de maíz, y en específico para la sugerencia de esquemas de fertilización. Determinando que existen tres nutrientes bases para todo cultivo: nitrógeno, fósforo y potasio, la cantidad a suministrar dependerá del mismo. Asimismo, se deben tomar en cuenta otras variables como el pH y la conductividad eléctrica.

Una vez recopilada esta información se agregó una sección al sistema experto para realizar la clasificación del suelo, lo anterior con ayuda de la NOM-021-RECNAT-2000, siendo el estándar mexicano expedido por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales en el año 2000 que establece las especificaciones de fertilidad y clasificaciones de suelo.

Con respecto a la recomendación del fertilizante, de la misma norma se tomaron los diferentes niveles de nitrógeno, fósforo y potasio y en función de los mismos se elaboró un conjunto de reglas para evaluar la mejor recomendación de fertilizante a suministrar.

Lo anterior se realizó con el apoyo de los ingenieros agrónomos. Destacando que previamente se llevó a cabo un sondeo en diferentes sucursales de venta de químicos agrícolas para conocer los fertilizantes más sugeridos en el cultivo de maíz. Por lo que, el SE hoy en día únicamente sugiere Urea, Triple 16, Nutri Wunder y Nitrato de potasio. Ya que son los productos que mayormente suelen comercializar para este cultivo. No obstante, y tomando en cuenta la estructura del SE resulta sencillo agregar más marcas de fertilizante para ofrecer una variedad más amplia.

Después de una serie de mejoras al SE, se definió la fórmula general de fertilización recomendada por el INIFAP para la zona montañosa central de Veracruz: 150-46-30 de NPK. Por lo tanto, el SE es capaz de clasificar el terreno, sugerir el tipo y cantidad de fertilizante a aplicar.

Las sugerencias del mismo se aplicaron en dos parcelas del municipio de Coacoatzintla con el objetivo de conocer si la sugerencia de un SE es capaz de mejorar la eficiencia productiva y reducir la cantidad de insumos aplicados. En cada terreno se sembraron 100 plantas de maíz de las cuales 10 fueron tomadas en cuentas para llevar a cabo un análisis de varianza (ANOVA). Fijando un nivel de significancia del 5%, umbral que permitió definir diferencias significativas entre los tres tratamientos: testigo (tratamiento A), esquema de fertilización empleado por el agricultor (tratamiento B) y esquema de fertilización sugerido

por el SE (tratamiento C). Donde las variables a evaluar se dividieron en dos grupos, durante el crecimiento: altura de la planta, diámetro del tallo, número de hojas; a la cosecha: diámetro, largo y peso del elote, número de granos por hilera y totales, así como el peso del grano.

Para realizar esta técnica, inicialmente se recolectaron las mediciones a los 14, 48, 60 y 88 días después de la germinación, al contar con el conjunto de datos se organizaron en un archivo de Excel. Y con ayuda del software XLSTAT, se llevó a cabo el ANOVA para cada conjunto de datos.

Los resultados de Los Planes fueron los siguientes: de entrada, el SE clasificó el terreno con un pH: fuertemente ácido, nitrógeno: muy alto, potasio: alto, fósforo: bajo y conductividad eléctrica: suelo salino. Por consiguiente, la sugerencia de fertilizante en función de los datos anteriores fue: Triple 16 y DAP en las siguientes proporciones, -218 kg N, 64 kg P y 84 kg K. En tanto, el productor suministró 270 kg N, 105 kg P, 120 kg K y 20 kg Ca. Observando que existe una diferencia significativa entre tratamientos, tan solo, el software sugirió no aplicar N, y el agricultor destinó una enorme cantidad de N, en cuanto al potasio y fósforo, se dotó 41 y 36 kg más de lo necesario.

Sorprendentemente, el exceso de abono aplicado no mostró los resultados esperados, esto después de analizar los datos con XLSTAT, los datos mostrados a continuación comprenden hasta la última medición registrada de los 88 ddg. Con respecto a la altura de la planta el grupo de estudio C presentó los mejores estadísticos con un alto promedio de 241.6 cm, 7.5 y 20.2 cm más que los lotes B y A respectivamente. Por su parte en el diámetro del tallo, también se encontraron diferencias significativas, donde el lote C obtuvo los mejores frutos con 41.3 mm, a 5.2 y 5.9 de diferencia con los grupos B y A. Lo mismo sucede con el diámetro del elote, arrojando diferencias notorias, donde el lote C obtuvo el mejor dato con 52.1 mm.

En cambio, en el largo del elote, aun cuando el grupo C muestra los mejores estadísticos no se registró ninguna diferencia significativa. En cuanto al número de granos por hilera, tanto el tratamiento A y C estuvieron a la par con 1.2 granos de diferencia, aun así, con el exceso de fertilizante el lote B quedó muy por debajo con 30.4. Indudablemente, los datos

anteriores influyen directamente en el peso total del grano, donde el lote C obtuvo el mejor resultado con 113.3 gr, seguido del grupo A y B, con 83.7 y 51.7 gr.

Por su parte, el peso del elote mostró un desempeño similar con p-valor de 0.0001 lo cual indica una disparidad notoria, donde el grupo C exhibió el mejor resultado con 311.9 gr. Este estudio, muestra que fertilizar en función de las necesidades del terreno permite abonar lo que en realidad requiere la parcela, inversión equitativa, menos derroche de químico innecesario al suelo.

Por otro lado, los estadísticos de la zona de Chapultepec arrojaron los siguientes datos, según los resultados del laboratorio, la parcela tiene deficiencias significativas de fósforo y potasio, y un nivel medio de nitratos. Tanto el pH y el CIC se encuentran en rangos: moderadamente ácido y bajo respectivamente. Los resultados se aprecian en la Tabla 33. Por lo que, es necesaria una intervención inmediata para equilibrar estos nutrientes, fundamentales para el cultivo de maíz. En general este terreno presenta un desequilibrio notable en comparación con el anterior.

Al ingresar los valores en el software de evaluación, se recomendó la aplicación de Urea y Nutri Wunder. El tratamiento B recibió 200 kg de N, 180 kg de P y 90 kg de K. El lote C fue tratado con 82 kg de N, 74 kg de P y 86 kg de K, mientras que al conjunto de control no se le aplicó ningún químico. Aun cuando el agricultor aplicó más del doble de N y P en el tratamiento B, la altura de las plantas en el tratamiento C fue la mayor, alcanzando 218.1 cm, seguida por los tratamientos A y B con 177.6 cm y 166.8 cm, respectivamente. En contraste, no se observaron diferencias significativas en el diámetro del tallo.

En el diámetro del elote se observó una diferencia significativa entre los tres tratamientos, con un p-valor de 0.0001. El grupo C obtuvo los mejores resultados, con un diámetro de 52.75 mm, seguido por el grupo B con 38 mm y el grupo A con 31.25 mm. En cuanto al largo del elote, se observó una ligera diferencia. El tratamiento C nuevamente alcanzó el mayor valor con 24.25 cm. Sorprendentemente, el lote de control logró 2 cm más que el tratamiento B.

Notoriamente el número de granos por hilera afecta directamente los totales, el grupo C en el primer análisis obtuvo 38.75 granos y en el promedio total 556, adjudicándose el mejor

estadístico. Seguido del tratamiento B con 28.75 y 448.75 granos totales. Finalmente, en el peso del grano y del elote nuevamente el lote C logró el mejor resultado con 116 y 298 gr.

## 6 Trabajo futuro

Dado el incremento en la demanda de alimentos en las próximas décadas, es fundamental innovar en las diferentes etapas de la agricultura de precisión (AP). Optimizar la recomendación de fertilizantes es beneficioso tanto para los cultivos como para la economía del productor y la reducción del impacto ambiental. El uso de sensores para recopilar datos del suelo de manera periódica aumentaría la efectividad de las sugerencias proporcionadas por estos sistemas informáticos.

En primer lugar, se busca mejorar la eficacia del sistema experto (SE) mediante el uso de datos históricos recopilados, ampliando el análisis a más nutrientes y considerando una mayor variedad de marcas de fertilizantes, lo que se traduciría en mejores prácticas de fertilización. Con los datos históricos, se espera emplear algoritmos de aprendizaje automático. Asimismo, se prevé desarrollar una versión móvil de este sistema, ya que hoy en día, la mayoría de las personas tienen acceso a un dispositivo móvil, lo que facilitaría el acceso a la aplicación.

## 7 Referencias bibliográficas

1. Abdul, H., Azil, N., Davoudpoura, Y., Dungani, R., Hossain, M., Nazrul, I., Rosamah, E. & Saddon. N. (2014). The role of soil properties and it's interaction towards quality plant fiber: A review. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114010466>
2. Agrawal, R., Doshi, Z., Nadkarni, S., Shah, N. (2018). AgroConsultant: Intelligent Crop Recommendation System Using Machine Learning Algorithms. 2018 Fourth International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA). Obtenido de: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8697349>
3. Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios (ASERCA). (2018). ¿Conoces el origen del maíz? Más de 60 variedades de maíces forman parte de nuestra alimentación diaria. Obtenido de: <https://www.gob.mx/aserca/articulos/conoces-el-origen-del-maiz?idiom=es>
4. Alimento. (2020). Propiedades y valor nutricional. Maíz: fuente de vitaminas, minerales, antioxidantes y fibra. Obtenido de: [https://www.alimento.elconfidencial.com/nutricion/2020-08-17/maiz-vitaminas-minerales-fibra\\_1517062/](https://www.alimento.elconfidencial.com/nutricion/2020-08-17/maiz-vitaminas-minerales-fibra_1517062/)
5. ANDES. (s.f.). Manual. Desarrollo vegetativo del maíz. Obtenido de: <http://andes.center/wp-content/uploads/2019/10/Manual-Ciclo-del-Maiz.pdf>
6. Baeldung. (2022). Introduction to Drools. Obtenido de: <https://www.baeldung.com/drools>
7. Baula, A. (2020). Puente académico. Importancia de la agricultura en el desarrollo. Universidad Nacional de Rosario. Obtenido de: <https://observatorio.unr.edu.ar/wp-content/uploads/2020/08/Importancia-de-la-agricultura-en-el-desarrollo-socio-econ%C3%B3mico.pdf>
8. Baker, N. & Capel, P. (2011). National Water-Quality Assessment Program. Environmental factors that influence the location of crop agriculture in the conterminous United States. Obtenido de: [https://pubs.usgs.gov/sir/2011/5108/pdf/SIR2011\\_5108.pdf](https://pubs.usgs.gov/sir/2011/5108/pdf/SIR2011_5108.pdf)
9. Bayer. (2020). El incremento de la eficiencia de los sistemas agrícolas sólo se puede conseguir con el desarrollo de la tecnología. Obtenido de: <https://www.bayer.com/es/es/blog/espana-el-incremento-de-la-eficiencia-de-los-sistemas-agricolas>
10. Bhatnagar, V., Chandra, R. & Sunda, S. (2019). State of the Art and Gap Analysis of Precision Agriculture: A Case Study of Indian Farmers. International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems. 10. 72-92. 10.4018/IJAEIS.2019070105.

11. Becerro, Z., Izquierdo, C. & Ramos, A. (2019). Herramienta web para el desarrollo ágil de sistemas expertos. Universidad Ciencia y Tecnología. Obtenido de: <https://uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/view/90>
12. Berger, R. (2019). Farming 4.0: How precision agriculture might save the world Precision farming improves farmer livelihoods and ensures sustainable food production. Obtenido de: [https://www.rolandberger.com/publications/publication\\_pdf/roland\\_berger\\_precision\\_farming.pdf](https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_precision_farming.pdf)
13. Brecha cero. (2017). Las TIC como apoyo a la agricultura en países de desarrollo. Obtenido de: <https://brechacero.com/las-tic-como-apoyo-a-la-agricultura-en-paises-en-desarrollo/>
14. Bologna, J. & Walsh, A. M. (1997). The Accountant's Handbook of Information Technology, Editorial John Wiley and Sons.
15. Caro, A., Cisternas, I., Rodríguez, A. & Velásquez, I. (2020). Systematic literature review of implementations of precision agricultura. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169920312357>
16. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). (s.f.). Maíz. Obtenido de: <https://conacyt.mx/cibiogem/maiz>
17. Corona, I. (2016). El desarrollo de la agricultura y el impacto que tendría en las finanzas públicas de México. Premio nacional de las finanzas públicas 2016. Obtenido de: [https://cefp.gob.mx/formulario/Trabajo\\_12a.pdf](https://cefp.gob.mx/formulario/Trabajo_12a.pdf)
18. Chakraborty, P., Kumar, A. & Pooniwala, O. (2021). Intelligent Crop Recommendation System using Machine Learning," 2021 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC). Obtenido de: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9418375>
19. Enciso, A. (2021). México ocupa doceavo lugar en producción mundial de alimentos: Sader. La Jornada. Obtenido de: <https://www.jornada.com.mx/notas/2021/07/14/politica/mexico-ocupa-doceavo-lugar-en-produccion-mundial-de-alimentos-sader/>
20. Evans, R., Iversen, W. & Kim, Y. (2008). Remote Sensing and Control of an Irrigation System Using a Distributed Wireless Sensor Network. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Obtenido de: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4457920>
21. Forbes. (2022). La invasión de Rusia a Ucrania dispara hasta 180% el precio de los fertilizantes. Forbes. Obtenido de: <https://www.forbes.com.mx/invasion-rusia-ucrania-dispara-precio-fertilizantes/>
22. Fielding, R. (2000). Architectural styles and the design of network-based software architectures. doctoral dissertation, university of california, irvine. Obtenido de: [http://www.ics.uci.edu/~fielding/pubs/dissertation/rest\\_arch\\_style.htm](http://www.ics.uci.edu/~fielding/pubs/dissertation/rest_arch_style.htm)

23. González, P. (2019). Consecuencias ambientales de la aplicación de fertilizantes. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). Obtenido de: [https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/27059/1/Consecuencias\\_ambientales\\_de\\_la\\_aplicacion\\_de\\_fertilizantes.pdf](https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/27059/1/Consecuencias_ambientales_de_la_aplicacion_de_fertilizantes.pdf)
24. Grapheverywhere. (s.f.). Sistemas de recomendación | Qué son, tipos y ejemplos. Obtenido de: <https://www.grapheverywhere.com/sistemas-de-recomendacion-que-son-tipos-y-ejemplos/>
25. GRUMA. (2018). Inicio de cobertura. Obtenido de: [https://www.monex.com.mx/portal/download/reportes/Inicio%20de%20Cobertura%20de%20Gruma%20\(Septiembre%202018\).pdf](https://www.monex.com.mx/portal/download/reportes/Inicio%20de%20Cobertura%20de%20Gruma%20(Septiembre%202018).pdf)
26. Hidroponia. (2015). Importancia de la agricultura en México. Obtenido de: <http://hidroponia.mx/importancia-de-la-agricultura-en-mexico/>
27. Instituto Nacional de Transparencia, Acceso a la Información y Protección de Datos Personales (INAI). (2015). Guía para implementar un sistema de gestión de seguridad de datos personales junio de 2015. Obtenido de: [http://inicio.inai.org.mx/DocumentosdeInteres/Gu%C3%ADa\\_Implementaci%C3%B3n\\_SGSDP\(Junio2015\).pdf](http://inicio.inai.org.mx/DocumentosdeInteres/Gu%C3%ADa_Implementaci%C3%B3n_SGSDP(Junio2015).pdf)
28. INTAGRI. (2021). 17 consejos para mejorar el rendimiento de maíz. Parte I. Serie Cereales, Núm. 52. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 6 p. Obtenido de: <https://www.intagri.com/articulos/cereales/consejos-para-mejorar-el-rendimiento-en-maiz-p1>
29. Itelligent. (2021). Machine Learning e Inteligencia Artificial: cómo funciona un sistema de recomendación. Obtenido de: <https://itelligent.es/es/machine-learning-funciona-sistema-recomendacion/>
30. Intagri. (s.f.). La fenología del Maíz y su relación con la incidencia de plagas. Obtenido de: <https://www.intagri.com/articulos/fitosanidad/la-fenologia-del-maiz-y-su-relacion-con-la-incidencia-de-plagas>
31. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). (2015). Fertilización nitrogenada en maíz y lavado de nitratos. Fertilización única vs fertilización fraccionada. Obtenido de: [https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta\\_fertilizacion\\_nitrogenada\\_en\\_maiz\\_y\\_lavado\\_de\\_nitratos\\_1.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_fertilizacion_nitrogenada_en_maiz_y_lavado_de_nitratos_1.pdf)
32. Jiao, X., Lu, S., Song, L., Teng, Y., Wang, Y. & Wu, J. (2014). Soil and soil environmental quality monitoring in China: A review. *Environment International*, 69, 177–199. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412014001342>

33. Join Research Centre (JRC) of the European Commission, Monitoring Agriculture ResourcesS. (2014). Policy Department B: Structural and Cohesion Polices. Precision agriculture – An opportunity for EU farmers – Potential support with the CAP 2014-2020. Obtenido de:  
[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2014/529049/IPOL-AGR\\_I\\_NT\(2014\)529049\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2014/529049/IPOL-AGR_I_NT(2014)529049_EN.pdf)
34. Karthik, S., Shobana, M., Sabitha, R. & Vaishnavi, S. (2021). Agricultural Crop Recommendations based on Productivity and Season. En 2021 7th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS). Obtenido de: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9441736>.
35. Koga, K., Kunkuro, P., Muto, Y. & Satta, N. (2014)). A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water I: Relative gas diffusivity, air permeability, and saturated hydraulic conductivity. Soil and Tillage Research, 143, 172–179. Obtenido de:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198714000282>
36. La Sociedad Internacional de Agricultura de Precisión (ISPA). (2019). Precision Ag Definition. Obtenido de: <https://www.ispag.org/about/definition>
37. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (s.f.). 3. Productos agropecuarios. Subproductos y desechos. Obtenido de: <https://www.fao.org/3/AB461S/AB461S03.htm>
38. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (s.f.). Land & Water. Maize. Obtenido de:  
<https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/maize/en/>
39. Oficina de información científica y tecnológica para el congreso de la unión (INCyTU). 2018. Agricultura de precisión. Obtenido de: [https://www.foroconsultivo.org.mx/INCyTU/documentos/Completa/INCYTU\\_18-015.pdf](https://www.foroconsultivo.org.mx/INCyTU/documentos/Completa/INCYTU_18-015.pdf)
40. Organismo internacional de Energía Atómica (IAEA). (2020). El uso equilibrado de fertilizante gracias a las técnicas nucleares contribuye a aumentar la productividad y a proteger el medio ambiente. IAEA. Obtenido de:  
<https://www.iaea.org/es/newscenter/news/el-uso-equilibrado-de-fertilizante-gracias-a-las-tecnicas-nucleares-contribuye-a-aumentar-la-productividad-y-a-proteger-el-medio-ambiente>
41. MariaDB. (2022). MariaDB. Obtenido de: <https://mariadb.com/>
42. Marini, E. (2012). El modelo cliente servidor. Obtenido de: <https://www.linuxito.com/docs/el-modelo-cliente-servidor.pdf>
43. Matadamas, E. (2021). Manual para el cálculo de fórmulas generales de fertilización. Universidad Autónoma Chapingo.
44. Mzori, B. (2015). Forward and Backward Chaining Techniques of Reasoning in Rule-Based Systems. Obtenido de:

- <http://i-rep.emu.edu.tr:8080/xmlui/bitstream/handle/11129/2325/mzoribareen.pdf?sequence=1>
45. McBratney, A. & Whelan, B. Precision AG. – Oz Style. Obtenido de:  
<https://precision-agriculture.sydney.edu.au/wp-content/uploads/2019/08/PA-Oz.pdf>
  46. 26. Mejía, E., Menes, I. & Vaca, B. (2018). Metodología de construcción de un sistema experto utilizando reglas de inducción con programación estructurada. Obtenido de:
  47. <https://knepublishing.com/index.php/KnE-Engineering/article/view/3658/7635>
  48. Naciones Unidas (UN). (s.f.) Una población en crecimiento. Obtenido de:  
<https://www.un.org/es/global-issues/population#:~:text=Una%20poblaci%C3%B3n%20en%20crecimiento&text=Se%20alcanzaron%20los%205.000%20millones,mundo%20de%207%20mil%20millones%22>.
  49. Nagori, V. (2014). Types of Expert System: Comparative Study. Obtenido de:  
<https://www.ajouronline.com/index.php/AJCIS/article/view/948#:~:text=%C3%82%20There%20are%20mainly%20five,and%20neuro%2Dfuzzy%20expert%20syste>.
  50. Nigam, R. (2014). Why Usability Is Important? InfoBeans. Obtenido de:  
<https://www.infobeans.com/usability-testing>
  51. Paredes, B. (2021). Retos, innovación y el futuro de la agricultura en 15 frases Cambio climático, inversión, mano de obra, entre otros temas se tocaron este miércoles en el Foro EF Agro. El financiero. Obtenido de:  
<https://www.elfinanciero.com.mx/economia/2021/08/18/retos-innovacion-y-el-futuro-de-la-agricultura-en-15-frases/>
  52. Patel, A., & Jain, S. (2018). Formalisms of representing knowledge. *Procedia Computer Science*, 125, 542–549. Obtenido de:  
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.12.070>
  53. Patel, N., Shah, D., Shah, M., Talaviya, T. & Yagnik, H. (2020). Implementation of artificial intelligence in agriculture for optimisation of irrigation and application of pesticides and herbicides. Obtenido de:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S258972172030012X>
  54. PricewaterhouseCoopers. (2016). Sizing the prize. What is the real value of AI for your business and how can you capitalize. ¿Cuál es el verdadero valor de la inteligencia artificial para tu negocio y cómo capitalizas? Obtenido de:  
<https://www.pwc.es/es/publicaciones/tecnologia/sizing-the-prize.html>
  55. Procuraduría Federal del Consumidor. (2021). Biofertilizantes. gov.mx. Recuperado de: <http://www.gob.mx/profeco/articulos/biofertilizantes?idiom=es>
  56. Raja, S., Rishi, R., Sundaresan, E. & Srijit, V. (2017). Demand based crop recommender system for farmers. 2017 IEEE Technological Innovations in ICT for Agriculture and Rural Development (TIAR).  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8273714>

57. Rosenberg, D. & Stephens, M. (2007). Use case driven modeling object modeling with UML. Theory and practice.
58. Secretaria de Agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación (SAGARPA). (2017). Planeación agrícola nacional 2017- 2030. Maíz grano blanco y amarillo mexicano. Obtenido de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256429/B\\_sico-Ma\\_z\\_Grano\\_Blanco\\_y\\_Amarillo.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256429/B_sico-Ma_z_Grano_Blanco_y_Amarillo.pdf)
59. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2018). Con los colores del maíz, México se pinta solo. Obtenido de: <https://www.gob.mx/siap/articulos/con-los-colores-del-maiz-mexico-se-pinta-solo>
60. Servicio de Información Agroalimentaria y pesquera (SIAP). (2021). Comportamiento del PIB Agroalimentario al primer trimestre de 2021 (2020: I – 2021: I). Obtenido de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/643090/Comportamiento\\_PIB\\_Agroalimentario\\_1er\\_trimestre\\_2021.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/643090/Comportamiento_PIB_Agroalimentario_1er_trimestre_2021.pdf)
61. Servicio de Información Agroalimentaria y pesquera (SIAP). (2020). Estadística de uso tecnológico y de servicios en la superficie agrícola. Obtenido de: <https://www.gob.mx/siap/prensa/estadistica-de-uso-tecnologico-y-de-servicios-en-la-superficie-agricola?idiom=es>
62. Servicio de Información Agroalimentaria y pesquera (SIAP). (2020). Datos abiertos .Estadística de producción agrícola .Obtenido de: [http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos\\_a.php](http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos_a.php)
63. Servicio de Información Agroalimentaria y pesquera (SIAP). (2020). Avance de siembras y cosechas. Resumen por estado. Obtenido de: [http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola\\_siap\\_gobmx/ResumenProducto.do](http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenProducto.do)
64. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Escenario mensual de productos agroalimentarios. Dirección de Análisis Estratégico 11 de marzo de 2021. Obtenido de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/621461/Escenario\\_maiz\\_blanco\\_feb\\_2021.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/621461/Escenario_maiz_blanco_feb_2021.pdf)
65. Serratos, J. (2009). The Origin and Diversity of Maize in the Americas Continent. Obtenido de: <https://bit.ly/2T3vTgS>
66. Tauro, A. (s.f.). Las TIC en la aplicación de la agricultura – El contexto a nivel mundial retos y oportunidades. Obtenido de: <https://www.armandotauro.com/es/editorial/99-las-tic-en-la-aplicacion-de-la-agricultura-el-contexto-a-nivel-mundial-retos-y-oportunidades.html>
67. United States Department of Agriculture (USDA). (2020). Corn 2020 Export Highlights. Obtenido de: <https://www.fas.usda.gov/corn-2020-export-highlights>

68. Villanueva, J. (2018). Optimización de la fertilización del maíz forrajero (zea mayz) en Marcos Castellanos, Michoacán. IPN. Obtenido de: <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/27221>
69. Yakult. (2020). Beneficios del maíz: vitaminas y minerales. Obtenido de: <https://www.yakult.com.mx/2020/10/26/beneficios-del-maiz-vitaminas-y-minerales/>
70. YARA. (2022). Nutrición vegetal. Maíz. Deficiencias-Maíz. Obtenido de: <https://www.yara.com.mx/nutricion-vegetal/maiz/deficiencias-maiz/deficiencia-de-nitrogeno-vs-el-optimo-maiz/>

## Anexos

### 1. Cuestionario: Evaluación de reglas

Contenido de nitrógeno total (%) en suelos	Valoración según la NOM-021-SEMARNAT-2000
< 0.05	Muy bajo
0.05 – 0.10	Bajo
0.10 – 0.15	Medio
0.15 – 0.25	Alto
> 0.25	Muy alto

Contenido de fosforo (mg kg <sup>-1</sup> )	Valoración según la NOM-021-SEMARNAT-2000
< 5.5	Bajo
5.5 – 11	Medio
> 11	Alto

Contenido de potasio intercambiable (cmol kg <sup>-1</sup> )	Valoración según la NOM-021-SEMARNAT-2000
< 0.2	Muy baja
0.2 – 0.3	Baja

0.3 – 0.6	Media
> 0.6	Alta

Considerando los diferentes rangos que establece la NOM-021-SEMARNAT-2000. Y acorde su experiencia, a continuación, se presentación múltiples escenarios, con el objetivo de validar la recomendación que se está planteando. Sus respuestas se mantendrán en total resguardo y serán empleadas en un ámbito educativo.

**Caso 1:**

N: Muy bajo	P: Bajo	K: Muy baja
Recomendación: Urea y Nutri Wunder		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 2:**

N: Muy bajo	P: Bajo	K: Baja
Recomendación: Urea y Nutri Wunder		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 3:**

N: Muy bajo	P: Bajo	K: Media
Recomendación: Urea y Triple 16		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 4:**

N: Muy bajo	P: Bajo	K: Alta
Recomendación: Urea y DAP		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 5:**

N: Muy bajo	P: Medio	K: Muy baja
Recomendación: Urea y Nutri Wunder		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 6:**

N: Muy bajo	P: Medio	K: Baja
Recomendación: Urea y Nutri Wunder		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 7:**

N: Muy bajo	P: Medio	K: Media
Recomendación: Urea y Triple 16		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 8:**

N: Muy bajo	P: Medio	K: Alta
Recomendación: Urea y DAP		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 9:**

N: Muy bajo	P: Alto	K: Muy baja
Recomendación: Urea y Nutri Wunder		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 10:**

N: Muy bajo	P: Alto	K: Baja
Recomendación: Urea y Nutri Wunder		

A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:

**Caso 11:**

N: Muy bajo	P: Alto	K: Media
Recomendación: Urea y Triple 16		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 12:**

N: Muy bajo	P: Alto	K: Alta
Recomendación: Urea y Triple 16		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 13:**

N: Bajo	P: Bajo	K: Muy baja
Recomendación: Urea y Nutri Wunder		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 14:**

N: Bajo	P: Bajo	K: Baja
Recomendación: Urea y Nutri Wunder		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 15:**

N: Bajo	P: Bajo	K: Media
Recomendación: Urea y Triple 16		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 16:**

N: Bajo	P: Bajo	K: Alta
Recomendación: Urea y DAP		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 17:**

N: Bajo	P: Medio	K: Muy baja
Recomendación: Urea y Nutri Wunder		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 18:**

N: Bajo	P: Medio	K: Baja
Recomendación: Urea y Nutri Wunder		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 19:**

N: Bajo	P: Medio	K: Media
Recomendación: Urea y Triple 16		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 20:**

N: Bajo	P: Medio	K: Alta
Recomendación: Urea y Triple 16		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 21:**

N: Bajo	P: Alto	K: Muy baja
Recomendación: Urea y Nutri Wunder		

A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:

**Caso 22:**

N: Bajo	P: Alto	K: Baja
Recomendación: Urea y Nutri Wunder		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 23:**

N: Bajo	P: Alto	K: Media
Recomendación: Urea y Triple 16		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 24:**

N: Bajo	P: Alto	K: Alta
Recomendación: Urea y Triple 16		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 25:**

N: Medio	P: Bajo	K: Muy baja
Recomendación: Urea y Nutri Wunder		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 26:**

N: Medio	P: Bajo	K: Baja
Recomendación: Urea y Nutri Wunder		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 27:**

N: Medio	P: Bajo	K: Media
Recomendación: Urea y Triple 16		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 28:**

N: Medio	P: Bajo	K: Alta
Recomendación: Urea y DAP		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 29:**

N: Medio	P: Medio	K: Muy baja
Recomendación: Urea y Nutri Wunder		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 30:**

N: Medio	P: Medio	K: Baja
Recomendación: Urea y Nutri Wunder		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 31:**

N: Medio	P: Medio	K: Media
Recomendación: Urea y Triple 16		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 32:**

N: Medio	P: Medio	K: Alta
Recomendación: Urea y DAP		

A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:

**Caso 33:**

N: Medio	P: Alto	K: Muy baja
Recomendación: Urea y Nutri Wunder		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 34:**

N: Medio	P: Alto	K: Baja
Recomendación: Urea y Nutri Wunder		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 35:**

N: Medio	P: Alto	K: Media
Recomendación: Urea y Triple 16		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 36:**

N: Medio	P: Alto	K: Alta
Recomendación: Urea y Triple 16		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 37:**

N: Alto	P: Bajo	K: Muy baja
Recomendación: Triple 16 y Nutri Wunder		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 38:**

N: Alto	P: Bajo	K: Baja
Recomendación: Triple 16 y Nutri Wunder		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 39:**

N: Alto	P: Bajo	K: Media
Recomendación: Triple 16 y DAP		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 40:**

N: Alto	P: Bajo	K: Alta
Recomendación: Triple 16 y DAP		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 41:**

N: Alto	P: Medio	K: Muy baja
Recomendación: Triple 16 y Nutri Wunder		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 42:**

N: Alto	P: Medio	K: Baja
Recomendación: Triple 16 y Nutri Wunder		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 43:**

N: Alto	P: Medio	K: Media
Recomendación: Triple 16 y DAP		

A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:

**Caso 44:**

N: Alto	P: Medio	K: Alta
Recomendación: Triple 16 y DAP		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 45:**

N: Alto	P: Alto	K: Muy baja
Recomendación: Nutri Wunder		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 46:**

N: Alto	P: Alto	K: Baja
Recomendación: Nutri Wunder		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 47:**

N: Alto	P: Alto	K: Media
Recomendación: Nutri Wunder		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 48:**

N: Alto	P: Alto	K: Alta
Recomendación: Nutri Wunder		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 49:**

N: Muy alto	P: Bajo	K: Muy baja
Recomendación: DAP y Nutri Wunder		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 50:**

N: Muy alto	P: Bajo	K: Baja
Recomendación: DAP y Nutri Wunder		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 51:**

N: Muy alto	P: Bajo	K: Media
Recomendación: Triple 16 y DAP		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 52:**

N: Muy alto	P: Bajo	K: Alta
Recomendación: Triple 16 y DAP		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 53:**

N: Muy alto	P: Medio	K: Muy baja
Recomendación: Nutri Wunder		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 54:**

N: Muy alto	P: Medio	K: Baja
Recomendación: Nutri Wunder		

A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:

**Caso 55:**

N: Muy alto	P: Medio	K: Media
Recomendación: Triple 16		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 56:**

N: Muy alto	P: Medio	K: Alta
Recomendación: Triple 16		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 57:**

N: Muy alto	P: Alto	K: Muy baja
Recomendación: Triple 16		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 58:**

N: Muy alto	P: Alto	K: Baja
Recomendación: Triple 16		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 59:**

N: Muy alto	P: Alto	K: Media
Recomendación: Triple 16		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

**Caso 60:**

N: Muy alto	P: Alto	K: Alta
Recomendación: Triple 16		
A) Sugerencia correcta B) Sugerencia incorrecta C) Otro:		

## Cuestionario: Evaluación de métricas

Estimado participante:

Gracias por dedicar unos minutos de su tiempo para responder a este cuestionario sobre recomendación de fertilizante. Su opinión es extremadamente valiosa para nosotros, ya que nos ayudará a comparar la sugerencia entre usted experto y el sistema inteligente que se programó para la sugerencia de esquemas de fertilización en el cultivo de maíz.

Este cuestionario está diseñado para recopilar información sobre su experiencia. Sus respuestas serán confidenciales y solo se utilizarán con fines de investigación. No se le pedirá que proporcione información personal identificable.

Por favor, responda a todas las preguntas de manera sincera y precisa. No hay respuestas correctas o incorrectas, solo su opinión y experiencia son importantes para nosotros. Únicamente debe aceptar o rechazar el esquema de fertilización que se muestra en cada caso.

Le agradecemos de antemano su colaboración y participación en este estudio.

Atentamente:

José Rolando García Alba estudiante de la Maestría en Sistemas Computacionales.

### Caso 1:

Macronutriente	Nivel
Nitrógeno	Muy alto
Fósforo	Bajo

Potasio	Alto
<b>RECOMENDACIÓN: TRIPLE 16 Y DAP</b>	
Aceptar	Rechazar

**Caso 2:**

Macronutriente	Nivel
Nitrógeno	Muy alto
Fósforo	Alto
Potasio	Medio
<b>RECOMENDACIÓN: TRIPLE 16</b>	
Aceptar	Rechazar

**Caso 3:**

Macronutriente	Nivel
Nitrógeno	Medio
Fósforo	Bajo
Potasio	Alto
<b>RECOMENDACIÓN: UREA Y DAP</b>	
Aceptar	Rechazar

**Caso 4:**

<b>Macronutriente</b>	<b>Nivel</b>
Nitrógeno	Medio
Fósforo	Bajo
Potasio	Muy bajo
<b>RECOMENDACIÓN: UREA Y NUTRI WUNDER</b>	
Aceptar	Rechazar

**Caso 5:**

<b>Macronutriente</b>	<b>Nivel</b>
Nitrógeno	Muy bajo
Fósforo	Medio
Potasio	Bajo
<b>RECOMENDACIÓN: UREA Y NUTRI WUNDER</b>	
Aceptar	Rechazar

**Caso 6:**

<b>Macronutriente</b>	<b>Nivel</b>
Nitrógeno	Medio
Fósforo	Medio
Potasio	Medio
<b>RECOMENDACIÓN: UREA Y TRIPLE 16</b>	
Aceptar	Rechazar

**Caso 7:**

Macronutriente	Nivel
Nitrógeno	Muy alto
Fósforo	Alto
Potasio	Alto
<b>RECOMENDACIÓN: TRIPLE 16</b>	
Aceptar	Rechazar

**Caso 8:**

Macronutriente	Nivel
Nitrógeno	Alto
Fósforo	Alto
Potasio	Alto
<b>RECOMENDACIÓN: NUTRI WUNDER</b>	
Aceptar	Rechazar

**Caso 9:**

Macronutriente	Nivel
Nitrógeno	Alto
Fósforo	Bajo
Potasio	Medio

<b>RECOMENDACIÓN: TRIPLE 16 Y DAP</b>	
Acceptar	Rechazar

**Caso 10:**

<b>Macronutriente</b>	<b>Nivel</b>
Nitrógeno	Muy bajo
Fósforo	Bajo
Potasio	Bajo
<b>RECOMENDACIÓN: UREA Y NUTRI WUNDER</b>	
Acceptar	Rechazar