

Diseño de un sistema web basado en datos geoespaciales para identificación y visualización de predios de limón



Colaboración

César Villaseñor Sotomayor; Ramona E. Chavez Valdez; Patricia E. Figueroa Millán; Fernando Pech May, Instituto Tecnológico Superior de los Ríos; J. Reyes Benavides Delgado, Tecnológico Nacional de México / Colima

Fecha de recepción: 13 de marzo 2024

Fecha de aceptación: 7 de junio de 2024

RESUMEN: La agricultura es prioritaria en la economía global, con 5,000 millones de hectáreas utilizadas en todo el mundo. En México se destinan 32.1 millones de hectáreas y en Colima se utilizan 156.5 mil hectáreas. Colima destaca en la producción de cultivo perenne. Sin embargo, organizaciones productivas, como el Consejo Estatal de Productores de Limón (COEPLIM), carecen de un padrón que identifique los predios dedicados al cultivo de limón. El objetivo de esta investigación es diseñar un sistema web basado en datos geoespaciales que permita identificar y visualizar los predios de cultivo de limón e integrar un padrón. Se adoptó el Proceso Unificado Ágil (PUA) como metodología, ya que facilita la definición del modelado del sistema y permite entregas tempranas. La plataforma informática diseñada permite identificar y visualizar los predios de cultivo de limón, proporcionando información como año censado, superficie de cultivo de limón y marco de plantación. Además, permite la actualización periódica de la información de los predios, mejorando la toma de decisiones y la gestión de proyectos estratégicos. El sistema es flexible y escalable para cualquier cultivo agrícola e impacta en la disponibilidad de información actualizada sobre las superficies de cultivo de limón y las proyecciones de cosecha.

PALABRAS CLAVE: Censo, Limón, Padrón, Sistema de Información Geográfica, Sistema web.

ABSTRACT: Agriculture is a priority in the global economy, with 5,000 million hectares used worldwide. In Mexico, 32.1 million hectares are used and in Colima, 156.5 thousand hectares are used. Colima stands out in the production of perennial crops. However, productive organizations, such as the State Council of Lemon Producers (COEPLIM), lack a register that identifies the properties dedicated to lemon cultivation. The objective of this research is to design a web system based on geospatial data that allows identifying and visualizing the lemon cultivation properties and integrating a register. The Agile Unified Process (UAP) was adopted as a methodology, since it facilitates the definition of the system modeling and allows early deliveries. The software platform designed allows the identification and visualization of lemon farms, providing information such as census year, area under lemon cultivation and planting frame. It also allows for the periodic updating of farm information, improving decision making and strategic project management. The system is flexible and scalable for any agricultural crop and impacts the availability of updated information on lemon growing areas and crop projections.

KEYWORDS: Census, Geographic Information System, Lemon, Web system.

INTRODUCCIÓN

La agricultura ha desempeñado un papel crucial a lo largo de la historia de la humanidad, siendo un pilar fundamental para el desarrollo de la sociedad moderna. En términos de extensión territorial dedicada a actividades agrícolas, se estima que globalmente existen aproximadamente 5 mil millones de hectáreas (ha) [1], a nivel nacional se destinan 32.1 millones de ha [2], y más específicamente en el estado de Colima la actividad agrícola abarca una superficie que supera las 156.5 mil ha [3].

El censo agrícola desempeña un papel fundamental en diversos aspectos clave, en términos de planificación agrícola,

contribuye a la formulación de políticas relacionadas con la seguridad alimentaria, cuestiones de género y promoción de la producción agrícola, inversiones, crecimiento económico y desarrollo rural. Además, provee datos esenciales para la investigación y comprensión de la composición y distribución histórica y futura del crecimiento del sector agrícola, facilitando decisiones de inversión y negocios. En el ámbito de la agricultura y el medio ambiente, permite monitorear cambios ambientales a lo largo del tiempo y ofrece datos sobre prácticas sostenibles, respaldando la toma de decisiones para mitigar efectos adversos [4].

En México, desde 1930 el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y otros organismos ha realizado censos agrícolas con resultados que muestran el comportamiento en la producción de limón, así como las ha dedicadas a otros cultivos [5]. Así, en el 2022, en el estado de Colima predominó el limón como el cultivo perenne, abarcando una extensión de 22,651 ha y generando una producción notable de 231,843 toneladas [3]. Sin embargo, la frecuencia de aplicación de los censos ha dejado vacíos de información agrícola por periodos importantes, que se han reducido con el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) al proveer información para la toma de decisiones con impacto en el aumento de la calidad de vida de la población [6].

Pese al uso masivo de los SIG, a la fecha organizaciones como COEPLIM carecen de una herramienta que identifique y registre a gran escala los predios dedicados al cultivo de limón, pues le representa inversión y recurso para el manejo de cartografía. Situación que trae como consecuencia, la falta de actualización oportuna de la información agrícola y la limitación en el desarrollo agrícola, complicando el monitoreo de las tendencias agrícolas, la adaptación a las cambiantes condiciones del ecosistema, la adopción de prácticas agrícolas sostenibles y la participación en programas estratégicos de innovación como contribución a la soberanía alimentaria.

Ante ello, se propone el modelado del sistema web basado en datos geoespaciales, titulado para efectos de este artículo "GeoPlim", que permita identificar y visualizar los predios de cultivo de limón en el estado de Colima. El objetivo principal de GeoPlim es censar digitalmente mediante identificación, los predios dedicados al cultivo de limón, integrar un padrón y actualizarlo periódicamente.

En la actualidad, los SIG siguen vigentes como herramientas para mostrar datos geoespaciales e integrar un padrón categorizado útil al sector agrícola. En ese contexto, en China, G. Fang et al [7] abordan la importancia de la información precisa y oportuna sobre los cultivos para garantizar la seguridad alimentaria y promover la gestión agrícola sostenible, especialmente, caracterizada por la fragmentación de tierras y una di-

versidad de tipos de cultivos. La investigación resalta los desafíos asociados con el mapeo de cultivos a escala final debido a la heterogeneidad del paisaje. Para superar estos desafíos, utilizaron un método de mapeo de cultivos basado en la zonificación, que implicó la segmentación del área según métricas del paisaje y la selección de esquemas de características y algoritmos de clasificación óptimos. Los resultados indican que este enfoque de mapeo de zonificación mejora la precisión del mapeo de cultivos en paisajes agrícolas complejos en comparación con otros métodos de modelo único.

En Wuhan, China, H. Li et al [8] validaron la efectividad de la predicción del tipo de cultivo utilizando una red neuronal convolucional unidimensional (1D CNN) y un algoritmo de árbol de decisión. Para construir el modelo, se emplea la codificación y apilamiento de la capa de datos de tierras de cultivo (CDL) histórica en una matriz de ubicación de serie temporal 3D como conjunto de datos de entrenamiento. La validación en el condado de Cass, Iowa, para el mapa de siembra de cultivos de 2021 muestra una alta precisión general (0,927) y un coeficiente kappa de Cohen (0,857). Se obtuvo una precisión robusta en la predicción de los principales cultivos como maíz y soja, mientras que, los cultivos menores como la alfalfa muestran una precisión relativamente menor. Este enfoque presenta una opción viable para predecir mapas de siembra de los principales tipos de cultivos en años subsecuentes.

Los armenios, Z. Parisa y M. Nova [9], se enfrentaron a la falta de información precisa para crear un plan de manejo forestal para realizar inventarios forestales de manera eficiente y precisa. Crearon un método de aprendizaje automático para compilar un inventario forestal completo utilizando datos de teledetección. La empresa resultante, SilviaTerra, utiliza esta tecnología para proporcionar inventarios forestales en los Estados Unidos, mejorar la comprensión de los bosques y facilitar el monitoreo de servicios del ecosistema, como la captura de carbono, en colaboración con Microsoft.

El estudio de Xue et al. [10] en China utilizó métodos de segmentación multiescala SNIC combinados con algoritmos de clasificación como Random Forest y Support Vector Machine. El objetivo fue clasificar y reconocer cultivos utilizando imágenes de radar y ópticas de series temporales Sentinel, combinadas con métodos orientados a objetos y Google Earth Engine. Los resultados mostraron una mejora significativa en la precisión de la clasificación, alcanzando un 98.66% de precisión y un coeficiente kappa de 0.9823, destacando la eficacia de la combinación de segmentación multiescala y clasificación Random Forest.

En el contexto de la agricultura de precisión, la importancia del mapeo de la vegetación exalta su vínculo

directo con la calidad y el desarrollo de los cultivos, en la región de Atlixco, Puebla, V. Luna et al [11] realizaron un estudio donde se utilizaron imágenes de alta resolución con las cuales, a través de un análisis de color basado en la teoría de redes y programación en Python 2.7, se formaron matrices de adyacencia para los colores Rojo (R), Verde (G) y Azul (B). Los resultados indican que este enfoque permite la identificación de la calidad del cultivo, demostrando la viabilidad de evaluar la salud de los cultivos mediante análisis de imágenes de alta resolución.

En el estado de Colima, N. Farias et al [12], detallan la creación e implementación de un Geoportal Catastral centrado en la interoperabilidad y desarrollado con herramientas de código abierto. El Geoportal incluye un visualizador cartográfico, un módulo de administración para capas y servicios geoespaciales, y un módulo de servicios geoespaciales con el estándar de Servicio Web de Mapas. Este Geoportal tiene un gran potencial para la implementación de datos geoespaciales del censo agrícola, permitiendo una integración eficiente y detallada de información agrícola esencial. Al incorporar datos del censo agrícola, el Geoportal puede proporcionar análisis más precisos sobre la distribución de cultivos.

En lo general, las soluciones presentadas se enfocan en mapeos de cultivos y bosques forestales que responden a necesidades específicas; también utilizan diversos métodos y tecnologías en su desarrollo e implementación. A su vez, el diseño de GeoPlim presenta una solución específica para la identificación y visualización de cultivos de limón en el COEPLIM con el mapeo de predios agrícolas de limón a gran escala. Este sistema gestiona la información de los predios con cultivo de limón, y en diversas capas visualiza la información relevante para el organismo.

MATERIAL Y MÉTODOS

Para el modelado de GeoPlim se utilizó como materiales un trial de Enterprise Architect Project (EAP) basado en UML, además de FIGMA para la creación del prototipo visual y maquetado interactivo.

Para controlar el proceso de ingeniería de software se utilizó el PUA, que Ambler [13] simplificó a partir del Proceso Unificado Racional (RUP); esta metodología permite entregas parciales, y posibilita iteraciones que integran los requisitos priorizados del sistema. Como se muestra en la Figura 1, se organiza en cuatro fases: iniciación, elaboración, construcción y transición; por cada iteración se ejecutan las disciplinas de modelado, implementación, pruebas, despliegue, gestión de la configuración, gestión del proyecto y ambiente.

Durante la gestión del proyecto se definieron cuatro iteraciones, a lo largo de cada una de ellas se ejecutan las fases de la metodología. No obstante, la gestión del

proyecto, dada su relevancia, se adaptará de manera iterativa para asegurar la alineación con los objetivos del proyecto y las necesidades de COEPLIM. Además, la documentación del proyecto se realizará de forma continua, garantizando la calidad del software y facilitando tanto la gestión de cambios como el mantenimiento del mismo. Como resultado de la primera iteración se proyectó la identificación y visualización de predios de limón, y en este trabajo se presenta lo relacionado a las fases de iniciación y elaboración.

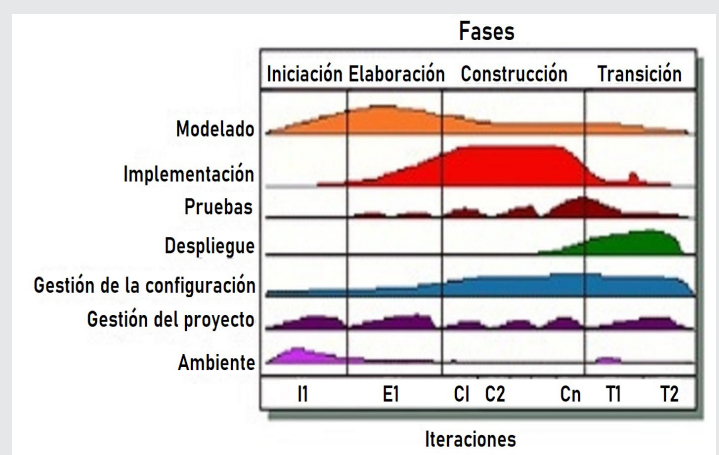


Figura 1. Metodología Proceso Unificado Ágil.

Fuente: Ambler, 2005.

Además, en la primera iteración, en la fase de iniciación se valoró la factibilidad técnica y económica del proyecto, mediante entrevistas se conocieron los escenarios de interacción del usuario con el sistema, se plasmaron en el diagrama de casos de uso que muestra la Figura 2, se definieron los requerimientos y se procedió al modelado.

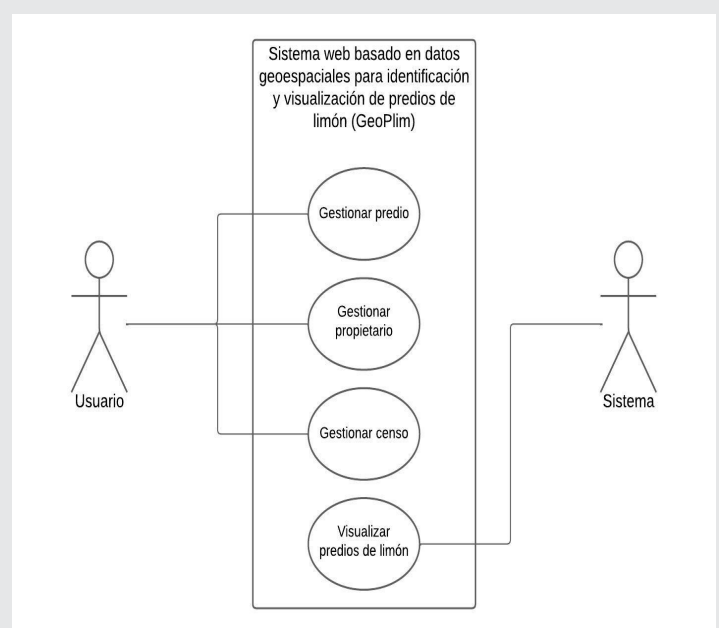


Figura 2. Diagrama de casos de uso del sistema GeoPlim.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, en el diagrama de casos de uso, el usuario puede efectuar la gestión del predio, del propietario, del censo y la visualización de los predios de limón. El sistema ofrece las herramientas necesarias para incluir en la gestión de los predios las funcionalidades de registrar, editar, mostrar y eliminar. Se realizaron cambios en los requisitos del sistema y algunos refinamientos, asegurando su alineación con los objetivos del proyecto.

Durante la fase de elaboración, igual en el modelado, se utilizó EAP para construir el diseño del sistema con base en el alcance marcado. También se usó FIGMA, para la presentación visual de las interfaces y simulación de la interacción con el usuario, lo que dio como resultado el prototipo, que permitió realizar pruebas de aceptación con el usuario.

Las características técnicas asociadas al diseño del sistema se plasmaron en los diagramas UML de:

- Clases, enfocadas en los objetos del contexto de predios con cultivo de limón.
- Datos, para almacenar y recuperar la información alfanumérica relacionada con la identificación de predios a partir de los datos geoespaciales.
- Interfaz de usuario, para el registro de los predios identificados con cultivo de limón y su respectiva visualización.
- Despliegue para representar la infraestructura computacional y el flujo de operación de GeoPlim en entorno de producción.

Cabe señalar, que durante la fase de construcción para el procesamiento de imágenes se utilizarán técnicas de índice radiométrico (IR), que F. Ramoino y M. Fitrzyk [14] refieren como mediciones cuantitativas derivadas de datos de teledetección al combinar mediciones de diversas bandas espectrales. Por otra parte, estos datos provenientes demandan una considerable capacidad de procesamiento, los cuales se reflejan en costos elevados. Por tanto, como respuesta a esta limitante surge Google Earth Engine (GEE) [15], una plataforma basada en la nube que facilita el acceso y la utilización de recursos informáticos de alto rendimiento específicamente destinados al análisis de extensas colecciones de datos geoespaciales; dentro de GEE se provee el algoritmo Random Forest [16] y el cual será utilizado, considerándose como un clasificador compuesto por una colección de árboles de decisión donde cada uno se genera de forma aleatoria, siendo independientes e idénticamente distribuidos y cada árbol emite un voto para determinar la clase más popular.

Por otro lado, se han realizado pruebas con diversos escenarios, utilizando 16 predios de limón como base,

con la finalidad de verificar la viabilidad técnica del proyecto. En uno de los escenarios, un predio tenía palmeras entre los limones, lo que causaba errores en el modelo. Inicialmente, el modelo identificaba hectáreas con solo palmeras como si fueran limones porque cumplían con la categoría. Para corregir esto, se decidió separar estos predios y crear dos divisiones específicas: una para clasificar solo limones y otra para palmeras. Ahora, estos predios tienen dos categorías visibles, donde un píxel se clasifica como limón y otro como palmera, haciendo la división correspondiente.

En otro escenario, el modelo solo se entrenó con una etapa de crecimiento maduro del cultivo. Esto provocó que los predios de limón en pleno crecimiento se clasificaran incorrectamente como tierra. Al identificar este problema, se vio necesario agregar los cultivos en varias etapas de crecimiento para mejorar la precisión del modelo. En concordancia con las pruebas y la literatura, el comportamiento del algoritmo indica que es una herramienta de clasificación eficaz, fiable y precisa, adecuada para aplicaciones prácticas en la gestión agrícola.

Por otro lado, el uso de Sentinel-2, definida como una plataforma de adquisición de datos de la superficie terrestre [17], se justifica porque sigue una trayectoria diseñada para reducir la presencia de nubes y garantizar una buena iluminación solar para capturar datos. Esto permite que el satélite capture cambios en intervalos cortos, obteniendo imágenes del mismo lugar cada cinco días. Además, ofrece imágenes con una resolución que varía de 10 a 60 metros, lo cual es mejor que muchos otros satélites de resolución media. Entre otros beneficios puede reducir los costos debido a que ofrece datos gratuitos y de alta calidad, en contraste con plataformas como Pléiades [17], que pueden resultar costosas.

En general, la combinación del PUA con EAP y FIGMA condujo al diseño del sistema de forma integral flexible, asegurando la calidad del producto final. Es importante mencionar que las iteraciones restantes de la metodología PUA para la ejecución de las fases y disciplinas que implementan el proyecto quedan fuera del alcance de este artículo, ya que se centra en la especificación y modelado del sistema.

RESULTADOS

Después de analizar las necesidades de información de COEPLIM respecto al censo de predios de limón para mantener un padrón actualizado, se tuvo como resultado el diseño del sistema GeoPlim. Como se muestra en la Figura 3, este sistema web se diseñó considerando una arquitectura en capas, presentada en cuatro capas: capa de presentación, capa de aplicación, capa de dominio y capa de infraestructura.

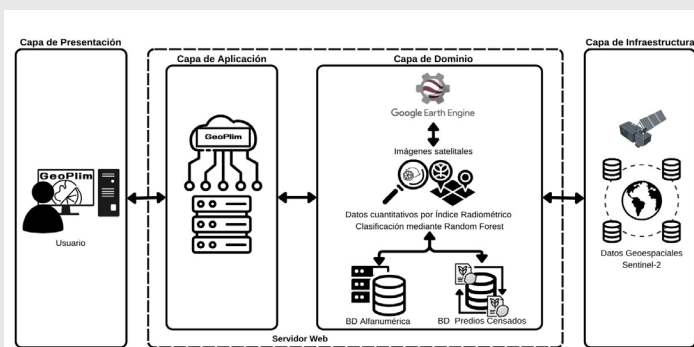


Figura 3. Modelo conceptual de GeoPlim.

Fuente: Elaboración propia.

La primera capa de presentación, muestra las funcionalidades que permiten la interacción con el sistema GeoPlim a través de la Interfaz Gráfica de Usuario (GUI, por sus siglas en inglés), procurando un entorno de interacción cómodo e intuitivo a través de un navegador web; la segunda capa de aplicación es responsable del manejo de la lógica de negocio y la coordinación de las interacciones entre las diferentes componentes del sistema GeoPlim, permitiendo la gestión de las funcionalidades que desea ejecutar el usuario; la tercera capa de dominio, implementa la lógica de negocio y las reglas de aplicación en GEE, teniendo como responsabilidad el preprocesamiento y procesamiento de las imágenes satelitales el cual se lleva a cabo mediante el cálculo de IR para obtener datos cuantitativos sobre la vegetación, posteriormente, se realiza la clasificación mediante el algoritmo de clasificación supervisado con RF enfocado en cultivos en la agricultura de precisión, si se identifica limón entonces se considera el predio como censado y se guarda la información en la base de datos (BD) alfanumérica para su respectiva visualización, además, se encarga de la interacción con la cuarta capa de infraestructura; esta última, es responsable de la adquisición de las imágenes satelitales a través de la plataforma de Sentinel-2, de la cual se obtienen, entre otras cosas, las imágenes terrestres de alta resolución para el procesamiento. Cabe mencionar que las tecnologías utilizadas tanto para la obtención, identificación y visualización son de código abierto.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, es fundamental destacar que en la Capa de Dominio se trabaja con el algoritmo que describe el método para procesar imágenes satelitales de Sentinel-2 y clasificar diferentes tipos de cobertura terrestre (con el objetivo principal de predios de limón) en el estado de Colima. Primero, se eliminan las nubes de las imágenes para evitar interferencias. Luego, se calculan índices de vegetación. Posteriormente las imágenes se recopilan y filtran para seleccionar las de baja cobertura de nubes, combinándolas en una sola imagen que resulta más limpia. Utilizando datos etiquetados, se entrena un modelo de aprendizaje automático para

clasificar el terreno en categorías como bosque, agua y cultivos.

Para validar el algoritmo, validación que además se documentó, se realizaron varias pruebas iniciales para determinar los mejores parámetros para la clasificación del modelo Random Forest, enfocándose en ajustar la cantidad de árboles de decisión. Una vez obtenidos los parámetros óptimos, se implementaron filtros adicionales para eliminar nubes y manchas no deseadas en las imágenes satelitales.

En el proceso de validación de este tipo de algoritmos, es común dividir un conjunto de datos en dos subconjuntos: entrenamiento y prueba. Una proporción ampliamente utilizada para esta división es 80:20, donde el 80% de los datos se emplea para el entrenamiento y el 20% restante para la prueba. Esta elección se basa en el principio de Pareto, también conocido como la regla del 80/20, una regla empírica popular entre los profesionales. El principio de Pareto [18], que establece que aproximadamente el 80% de los efectos proviene del 20% de las causas, es aplicable en diversos contextos, incluido el aprendizaje automático. Al aplicar este principio a la división de datos, se asume que el 80% de los datos disponibles será suficiente para capturar la mayoría de las características y patrones necesarios para entrenar el modelo de manera efectiva, mientras que el 20% restante proporcionará una muestra representativa para evaluar su rendimiento.

Las imágenes empleadas abarcan el periodo comprendido entre el 1 de diciembre de 2023 y el 31 de mayo de 2024. Durante el proceso de clasificación, se definieron ocho categorías distintas: "Limón", "Agua", "Ciudad", "Palmeras", "Cultivos", "Piña", "Tierra" y "Bosque". De manera específica, se añadieron las categorías "Palmeras" y "Piña" para mejorar la precisión del algoritmo. La inclusión de "Palmeras" fue crucial debido a que muchos agricultores intercalan palmeras entre los cultivos de limón, lo que generaba ruido en la clasificación, dado que existían predios exclusivamente de palmeras que eran identificados erróneamente como limones. Por otro lado, se añadió la categoría "Piña" ya que, en ciertas temporadas, estos cultivos son cubiertos con una malla protectora que, desde la vista satelital, no sigue un patrón normal de cultivo y su color, similar al azul, provocaba que el algoritmo los clasificara frecuentemente como cuerpos de agua. Como resultado de estas optimizaciones, el algoritmo alcanzó una precisión superior al 80% en la validación.

El diseño se expone en varios diagramas, en principio, el diagrama de clases presentado en la Figura 4 muestra las clases con atributos y métodos, estos últimos habilitan el comportamiento de las clases para gestionar la información correspondiente a las funcionalidades del sistema.

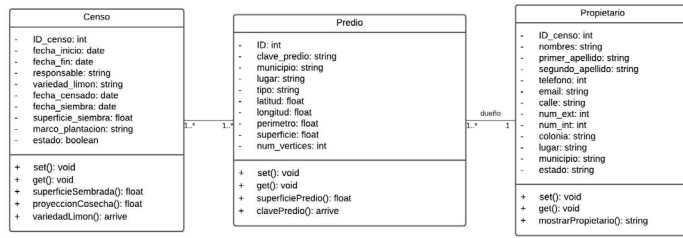


Figura 4 . Diagrama de clases para GeoPlim.

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la clase 'Censo', a partir del procesamiento de imágenes con cultivo de limón, se establecerá el predio con dicho cultivo, así como otros datos de interés. Los atributos de la clase 'Predio' se obtienen de los documentos legales de los propietarios, y permiten identificar a través del atributo clave_predio la superficie del predio, cabe resaltar que hay casos en los cuales el predio está parcialmente sembrado de limón.

Por otro lado, el diagrama de datos que se muestra en la Figura 5 permite visualizar la BD alfanumérico en la cual se guardarán los datos del censo (tabla con el mismo nombre).

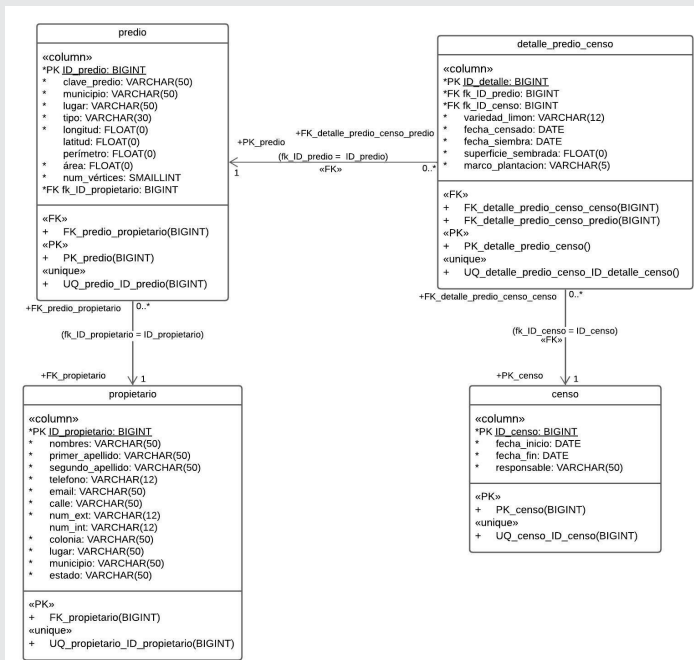


Figura 5. Diagrama de datos para GeoPlim.

Fuente: Elaboración propia.

El censo se realiza en cierto periodo, tiene un responsable técnico y considera datos como la variedad de limón, fecha de identificación, fecha de sembrado, superficie sembrada y marco de plantación del limón. Cabe precisar, que estos datos son los que podrán actualizarse periódicamente, en virtud de que algunos productores por factores de comercialización o enfermedad deciden sustituir el pro-

ducto a cultivar. También, en esta tabla se puede apreciar si la cantidad de superficie sembrada que corresponde al total del área del predio.

La Figura 6 muestra en la barra lateral izquierda el menú de GeoPlim, que permite proyectar diferente información de los predios dependiendo de las opciones seleccionadas.

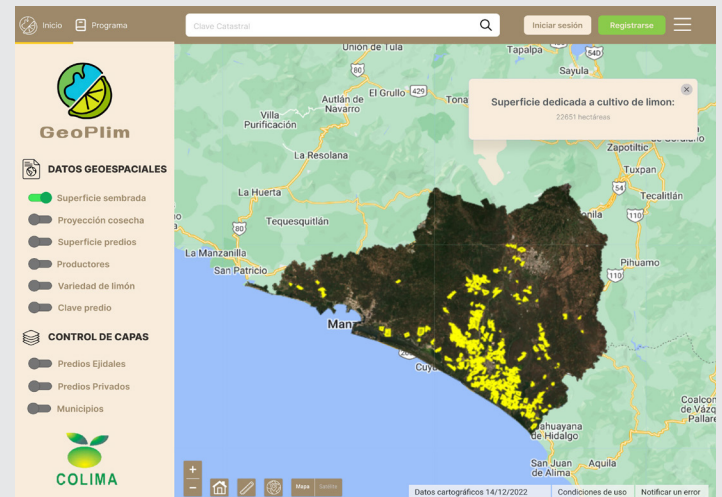


Figura 6. Menú de GeoPlim y superficie sembrada.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa, la opción "Superficie sembrada", ubicada en el panel lateral izquierdo está seleccionada y muestra en el mapa los predios con limón y el acumulado de la superficie que está con limón, cabe señalar que el área de los predios no necesariamente corresponde a la superficie sembrada. Las demás opciones, como "Proyección cosecha", activa en el mapa todos los predios con limón y en una ventana emergente el acumulado de la proyección de cosecha en toneladas. "Superficie predios", activa los predios que tienen cultivo de limón y el acumulado de superficie exento de cultivo de limón. "Productores", visualiza los predios con el nombre del propietario respectivo. "Variedad de limón", muestra los predios con la variedad de limón sembrado y emite una tabla con los acumulados por variedad.

Por último, si se desea visualizar los datos de un predio en particular, estos se muestran mediante la opción "Clave predio" que se presenta en la Figura 7.

A partir del ingreso de la clave de un predio con cultivo de limón se muestran las características del predio como certificado parcelario (o clave catastral en el caso de pequeña propiedad), ejido al que pertenece, año de censado, tipo de riego, tipo de suelo, fecha de siembra, marco de plantación, superficie sembrada y la proyección de cosecha anual.

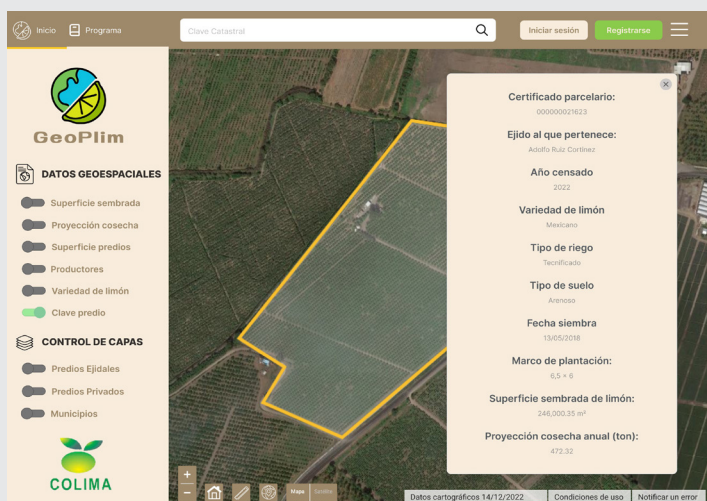


Figura 7. Información específica mediante Clave predio de GeoPlim.

Fuente: Elaboración propia.

La información resultante del censo es valiosa para que COEPLIM emita una proyección o enfoque estratégico sobre el cultivo, considerando aspectos como: la expansión, reemplazo o resiembra de limón; la planificación espacial para optimizar la distribución del cultivo de limón y maximizar el uso del espacio disponible; la producción esperada por periodo, basada en históricos de cosechas por predio.

Además, con GeoPlim implementado, COEPLIM mejorará su capacidad para mantener actualizado el padrón de cultivos de limón, visualizando de forma permanente los predios agrícolas con ese producto y, proyectando datos relevantes que permiten proponer enfoques trascendentales que contribuyan a la mejora en la toma de decisiones y a la gestión de proyectos estratégicos que permitan mejorar la eficiencia del cultivo de limón.

Discusión de Resultados

Con relación a las contribuciones de otros autores, GeoPlim coincide con los trabajos presentados al ser un sistema de aplicación específica para el cultivo de limón en el ámbito agrícola. Dicha aplicación específica le permite implementar en capas algunas funcionalidades, entre ellas las descritas en la sección previa como la superficie sembrada, proyección de cosecha, superficie predios, productores, variedad de limón y clave predio. En la parte técnica, se distingue por ser un sistema de bajo costo en la adquisición de datos geoespaciales, al considerar su implementación con tecnologías de código abierto, lo que contribuye a reducir costos asociados con licencias. Además, GeoPlim destaca por su eficacia al proponer el uso de técnicas de identificación y procesamiento de imágenes satelitales que han sido probadas en contextos similares. Estas técnicas, ya fueron validadas y permiten reducir la inversión en tiempo y recursos para agilizar el

desarrollo, que además es específico del cultivo de limón. Se trata de un sistema funcional, cuyo diseño fue probado y aceptado por los usuarios de COEPLIM.

CONCLUSIONES

Como resultado, se obtuvo el diseño del proceso de ingeniería de software para el sistema GeoPlim, asegurando y validando así la aceptación del sistema, logrando articular la especificación casos de uso, de la base de datos y la interfaz de usuario, necesarios para la identificación y visualización de los predios de cultivo de limón. Con la implementación de GeoPlim, se mantendrá actualizado el padrón de predios de cultivo de limón y se mejorará la planificación y gestión de los recursos agrícolas, creando una proyección o enfoque estratégico para el cultivo e impulsa el crecimiento y la productividad del sector. A futuro, se puede extrapolar el sistema a otros cultivos y a otro alcance geográfico, pues posee adaptabilidad a diferentes cultivos. Los beneficios de la extrapolación pueden llegar a ser valiosos para el sector agrícola en México, pues:

- Proporcionan una visión detallada y actualizada de los diferentes cultivos presentes en la región.
- Facilitan la creación de un padrón completo y actualizado de varios cultivos dentro de una región determinada.
- Ayudan en la planificación agrícola al permitir visión integral de la distribución de recursos, por ejemplo, ha disponibles versus ha dedicadas.
- Contribuyen a la toma de decisiones estratégicas basadas en la información sobre los cultivos presentes.

Al clasificar cultivos de manera precisa utilizando imágenes satelitales, es necesario llevar a cabo un preprocesamiento detallado y la utilización correcta de los índices radiométricos. Además, se necesita contar con datos de entrenamiento adecuados y ajustar bien los parámetros del algoritmo de Random Forest. Sin embargo, hay varios factores que pueden causar errores. Estos incluyen la confusión entre índices radiométricos de diferentes cultivos, los cambios en la apariencia de los cultivos a lo largo de las estaciones, los píxeles que contienen más de un tipo de clasificación, los efectos atmosféricos presentes y el ruido generado por un filtrado incompleto de nubes.

La precisión se evalúa comparando las predicciones con datos reales, ya que se utilizan 80% de los datos reales como entrenamiento para el modelo y 20% para evaluar y poder calcular el porcentaje de concordancia entre los resultados y el valor real. En entrevista con personal representante de COEPLIM, se indicó que inclusive un porcentaje de 85% de validación es satisfactorio para que ellos utilicen

la superficie de limón resultante como censo actualizado a cierta fecha.

A pesar de los beneficios que ofrece el sistema, habrá que realizar los ajustes pertinentes en virtud de las particularidades de cada producto agrícola. Estos desafíos deben ser abordados en futuros trabajos para garantizar la eficacia del sistema a largo plazo. Así, este sistema tiene el potencial de convertirse en una herramienta importante para la gestión oportuna en algunos productos agrícolas y la emisión de políticas públicas más pertinentes.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco especialmente al CONAHCYT por su apoyo a través del Sistema Nacional de Posgrados y por su compromiso en fomentar la formación académica en maestrías y doctorados a través del programa de Becas Nacionales. También quisiera reconocer y agradecer al Tecnológico Nacional de México, específicamente al campus Instituto Tecnológico de Colima, por contar con un cuerpo docente altamente comprometido en brindar un apoyo de calidad. Además, no puedo dejar de expresar mi profunda gratitud al Consejo Estatal de Productores de Limón (COEPLIM) por brindarme la oportunidad para trabajar en el desarrollo de un sistema web basado en datos geoespaciales, que apoye la gestión de dicho cultivo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] FAO, "Uso de la tierra en la agricultura según las cifras," *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 2020. <https://www.fao.org/sustainability/news/detail/es/c/1279267/#:~:text=La%20superficie%20de%20tierra%20destinada,y%20pastizales%20para%20el%20pastoreo.>

[2] INEGI, "RESULTADOS OPORTUNOS DEL CENSO AGROPECUARIO 2022.," INEGI, COMUNICADO DE PRENSA NÚM. 312/23, May 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/CA_ResOpt/CA_ResOpt2022.pdf

[3] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI, «Sala de prensa». <https://www.inegi.org.mx/app/saladeprensa/noticia.html?id=8585>

[4] Castaño Jairo, «Relevancia y promoción del censo agropecuario», *Taller Regional sobre las "Directrices Operativas" del Programa Mundial de Censos de Agricultura 2020 (CAM 2020) de la FAO*, 2019.

[5] INEGI, «Mexico - Encuesta Nacional Agropecuaria 2019», *Red Nacional de Metadatos*, 21 de abril de 2023. <https://www.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/607>

[6] Gobierno del Estado de México, «La importancia de los estudios de aptitud agrícola como herramientas de adaptación al cambio climático en el Estado de México», *Instituto Estatal de Energía y Cambio Climático*.

[7] G. Fang et al., "An improved zoning crop mapping approach in complex agricultural landscapes considering crop heterogeneity," *2023 11th International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)*, Wuhan, China, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/Agro-Geoinformatics59224.2023.10233662.

[8] H. Li, L. Di, C. Zhang, L. Lin, L. Guo and H. Zhao, "Prediction of Crop Planting Map Using One-dimensional Convolutional Neural Network and Decision Tree Algorithm," *2023 11th International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)*, Wuhan, China, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/Agro-Geoinformatics59224.2023.10233466.

[9] Z. Parisa y M. Nova, «This AI can see the forest and the trees», *IEEE Spectrum*, 19 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://spectrum.ieee.org/this-ai-can-see-the-forest-and-the-trees>

[10] H. Xue et al., «Object-Oriented Crop Classification Using Time Series Sentinel Images from Google Earth Engine», *Remote Sensing*, vol. 15, n.o 5, p. 1353, feb. 2023, doi: 10.3390/rs15051353.

[11] V. G. Luna Fernández, E. Vidal Robles, A. H. Abascal Alonso, y C. D. Cortes Quiroz, «Caracterización de cultivos con imágenes de VANT'S de alta resolución utilizando Teoría de Redes», *EDU-TEC*, vol. 20, n.º 21, pp. 76-88, dic. 2018.

[12] M. S. Gaytán Lugo, N. Farías Mendoza, R. E. Chávez Valdez, y F. Cervantes Zambrano, «Diseño e Implementación de un Geoportal Catastral para Visualización de Cartografía e Integración de Servicios Geoespaciales», *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, vol. 8, n.o 45, pp. 20-39, ago. 2020, [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/riiit/v8n45/2007-9753-riiit-8-45-20.pdf>

[13] S. W. Ambler, «The Agile Unified Process (AUP)», *Universidade Estadual de Campinas*.

[14] F. Ramoino y M. Fitzryk, "Clasificación de Cultivos Agrícolas con Radar de Apertura Sintética y Teledetección Óptica," *appliedsciences.nasa.gov*, 2021. https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2021-10/Ag_Part2_Spanish.pdf

[15] B. Liss, M. Howland, and T. Levy, "Testing Google Earth Engine for the automatic identification and vectorization of archaeological features: A case study from Faynan, Jordan.", *Journal of Archaeological Science: Reports*, vol. 15, pp. 299 - 304, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.08.013>

[16] L. Breiman, "Random Forests," *Machine Learning*, vol. 45, no. 1, pp. 5-32, Apr. 2001, doi: [10.1023/a:1010933404324](https://doi.org/10.1023/a:1010933404324)

[17] D. Phiri, M. Simwanda, S. Salekin, V. R. Nyiranda, Y. Murayama, and M. Ranagalage, "Sentinel-2 Data for Land Cover/Use Mapping: A Review," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 14, p. 2291, Jul. 2020, doi: [10.3390/rs12142291](https://doi.org/10.3390/rs12142291).

[18] R. Dunford, Q. Su, E. Tamang, y A. Wintour, «The Pareto Principle», *The Plymouth Student Scientist*, vol. 7, n.o 1, 2014, [En línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/200202097.pdf#:~:text=URL%3A%20https%3A%2F%2Fcore.ac.uk%2Fdownload%2Fpdf%2F200202097.pdf%0Avisible%3A%20%25%20>

