

ANÁLISIS Y EMPLEO DE IMÁGENES SATELITALES DE RADAR PARA DETERMINAR BIOMASA DE LA CAÑA DE AZÚCAR

ANALYSIS AND USE OF RADAR SATELLITE IMAGES TO DETERMINE SUGARCANE BIOMASS.

MSc. Pedro Luís García Pérez. (1)

MSc. Javier Iribarren Mondejar. (2)

Dr.C. Pedro Martínez Fernández. (3)

Dr.C. Maria Antonía Garcia Cisnero. (4) Dr.C.

Joselisa Maria Chaves. (5)

1. Universidade Estadual de Feira de Santana. Brasil. pedroluis1664@gmail.com

2. Universidade Estadual de Feira de Santana. Brasil. jim261269@gmail.com

3. UCT. GEOCUBA – IC. Cuba. pedrom@uct.geocuba.cu

4. UCT. GEOCUBA – IC. Cuba. marian@uct.geocuba.cu

5. Universidade Estadual de Feira de Santana. Brasil joslisa@uefs.br

RESUMEN.

El presente trabajo de investigación, tiene el objetivo de exponer los resultados obtenidos en el Análisis Bibliométrico y revisión bibliográfica sistemática de artículos, publicaciones, conferencias, trabajos realizados sobre el tema de investigación, las técnicas de búsquedas empleadas, de revisión Bibliométrica y bibliográfica sistemática, realizada en la base de datos Scopus, Google escolar, y las revistas de organizaciones internacionales: Sociedad Latinoamericana de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial (SELPER), Sociedad Internacional de Fotogrametría y Percepción Remota (ISPRS), entre otras, contextualizando su análisis en su alcance global, regional, nacional y local, presentando de manera coherente y documentada un panorama de la trayectoria y desarrollo de las tecnologías geoespaciales, la colaboración internacional, aplicaciones, conceptos, metodologías, las principales tecnologías y

medios técnicos más utilizados, este fundamenta el análisis y evaluación del empleo de las tecnologías geoespaciales y las mediciones de campo en el monitoreo y determinación del volumen de biomasa aérea de la caña de azúcar empleando imágenes satelitales de radar, que permita sustentar su marco teórico y conceptual, para llegar a resultados concretos en esta investigación.

También se exponen el desarrollo de los resultados de los trabajos de campo, así como los intentos por diseñar y establecer métodos, metodologías, para la creación de un modelo de generalización y gestión del estudio, cuantificación, determinación de la biomasa y población cañera en los campos

de cañas seleccionados de la Empresa Agroindustrial Azucarera "Ciro Redondo" del Grupo Empresarial AZCUBA, municipio Primero de Enero, provincia Ciego de Ávila.

Palabras clave: Biomasa; Imagen Satelital de Radar; Sensoramiento Remoto; Tecnologías Geoespaciales; Procesamiento Digital de imágenes.

ABSTRACT.

The objective of this research work is to present the results obtained in the Bibliometric Analysis and systematic bibliographic review of articles, publications, conferences, works carried out on the research topic, the search techniques used, bibliometric and systematic bibliographic review, carried out in the Scopus database, Google school, and the journals of international organizations: Latin American Society of Remote Sensing and Spatial Information Systems (SELPER), International Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), among others, contextualizing its analysis in its global, regional, national and local scope, presenting in a coherent and documented manner an overview of the trajectory and development of geospatial technologies, international collaboration, applications, concepts, methodologies, the main technologies and most used technical means, this bases the analysis and evaluation of the use of geospatial technologies and field measurements in the monitoring and determination of the volume of aerial biomass of sugar cane using radar satellite images, which allows supporting its theoretical and conceptual framework, to reach concrete results in this investigation.

The development of the results of the field work is also presented, as well as the attempts to design and establish methods, methodologies, for the creation of a generalization and management model of the study, quantification, determination of the biomass and sugarcane population in the selected cane fields from the Agroindustrial Sugar Company "Ciro Redondo" of the AZCUBA Business Group, Primero de Enero municipality, Ciego de Ávila province.

Keywords: Biomass; Radar Satellite Image; Remote Sensing; Geospatial Technologies; Digital Image Processing.

Recibido:21/02/2024

Aprobado:22/03/2024

INTRODUCCIÓN.

La caña de azúcar, desde los albores de nuestra nación, ha estado estrechamente ligada a nuestra economía. Esta exuberante planta, a pesar de no ser endógena de Cuba, encontró en nuestra isla un hábitat idóneo para su establecimiento y desarrollo, convirtiéndose el azúcar en el principal producto exportable, a partir del triunfo revolucionario de 1959 hasta la década del 90. (Hernández Vigoa, R; Oriá Martin, R. J; Rodríguez, Galvez, G.; Turquía, de Armas, R.; Olivera, Espinosa, R.; Méndez, León, A. (1987). "La caña de azúcar en Cuba", pág. 12,13.).

En Cuba, el cultivo de la caña de azúcar se realiza de forma extensiva y tiene un alto valor en la economía con la producción de azúcar crudo y refino. Los subproductos del proceso industrial son empleados como materia prima en la industria alimentaria, la química, la energía, la biotecnología, salud, entre otras. Como parte de la modernización del cultivo de la caña de azúcar se han introducido mejoras en las variedades, en las tecnologías para el riego y la cosecha y el transporte (Álvarez, 2014). Se han aplicado además técnicas de la agricultura de precisión en sistemas de fertilización, riego y control sanitario (Gutiérrez *et al.*, 2018).

El desarrollo científico alcanzado en el siglo XX y en el XXI, caracterizado por la era espacial y el vertiginoso empleo y globalización de las nuevas tecnologías de la informática y las comunicaciones en toda la esfera económica y social del país, ha permitido el fortalecimiento de las capacidades en estas tecnologías y la necesidad de preparar a los diferentes actores, en torno al empleo de las tecnologías geoespaciales de observación de la tierra, que han evolucionado a partir de diversas disciplinas y tecnologías, haciendo posible su integración y desarrollo de la Geomática.

El manejo y gestión de recursos naturales, agrícolas y del medio ambiente en el contexto de un desarrollo sostenible, requiere de la integración conceptual y espacial de la información geográfica, biofísica, socioeconómica, política, tecnológica y de georreferencia para el desarrollo de estas tecnologías, haciéndose necesario, establecer los principales antecedentes y los hitos fundamentales del desarrollo de estas tecnologías y sus aplicaciones en distintas ramas de la economía, así como identificar una idea de perspectivas futuras, que sirva de base para el estudio, observación, geolocalización, control, seguimiento y monitoreo de cultivos agrícolas (caña de azúcar, otros), conservación del medio ambiente, el cambio climático y fenómenos naturales extremos, provocados por el hombre y la naturaleza mediante un cambio de paradigma.

La determinación del estimado de la biomasa de caña de azúcar, tiene su nivel elemental y primario en el campo de caña y diversos son los factores que determinan su cálculo: variedad o cepa, productividad, edad, nivel de fertilización, riego, atención cultural del cultivo y otros, sobre cuya valoración existe amplia experiencia de los técnicos y productores, pero la cantidad de biomasa o población de caña que posee un campo dado y que constituye el parámetro de mayor incidencia, necesita ser medido, donde es imprescindible la cuantificación de las fuentes de error, no basta escoger un método suficientemente preciso y tomar las medidas necesarias para cometer errores mínimos en la ejecución de las mensuras.

El Catastro Nacional arroja el cálculo de las áreas totales de los campos con la exactitud requerida, pero sucede que en muchos casos en el momento de realizar la estimación, la totalidad del campo no está poblado de caña, debido a diversas causas: incrustaciones de malezas, marabú, penetraciones de guardarrayas, huecos o zonas deshabitadas de canas, áreas inundadas, etc., siendo considerables las influencias de estas fuentes de errores, que no permiten realizar un estimado bien preciso, y creemos es aquí donde radica la contribución principal en el error del estimado.

La medición de estas afectaciones resulta inoperante y costosa con las técnicas de mensura catastral, topográficas y otros métodos tradicionales de medición, ya que su contribución se debe a su numerosidad y no a la magnitud individual. La propuesta de nuestro trabajo es un conjunto de procedimientos que arrojan suficiente precisión en la cuantificación de estas fuentes de error, permitiendo la determinación acertada de la estimación de biomasa y población de caña de los campos y con ello poder realizar el reajuste de los estimados de cosecha de la caña de azúcar. El método en cuestión es: EMPLEO DE IMÁGENES SATELITALES DE RADAR PARA DETERMINAR BIOMASA DE LA CAÑA DE AZÚCAR, constituyendo la implementación de una nueva tecnología para determinar biomasa y monitorear el cultivo de la caña de azúcar en el país.

La determinación del índice de biomasa y de población cañera, consiste en la combinación de técnicas geoespaciales, geomáticas y mediciones en campo para determinar con mayor certidumbre posible la biomasa y población de los campos para determinar con precisión en la práctica el área de NO CAÑA; o sea, las áreas afectadas en cada campo, que no tienen caña. Con este resultado y conocida el área total por Catastro Especializado Cañero, se determina el área poblada o de biomasa, que permite reajustar los estimados productivos y acercarlos a los valores reales.

Para evaluar y dar solución a esta problemática, se exponen los resultados obtenidos en el análisis y revisión de artículos, publicaciones, conferencias, trabajos realizados sobre el tema de investigación,

mediante las técnicas de búsquedas empleadas, de revisión Bibliométrica y bibliográfica sistemática, realizada en la base de datos Scopus, Google escolar, y las revistas de organizaciones internacionales: Sociedad Latinoamericana de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial (SELPER), Sociedad Internacional de Fotogrametría y Percepción Remota (ISPRS), entre otras, contextualizando su análisis en su alcance global, regional y nacional en los conceptos, aplicaciones y metodologías para evaluar la efectividad del empleo de las tecnologías geoespaciales, la metodología, métodos y materiales empleados, así como el resultados de las mediciones de campo realizadas en el monitoreo del cultivo de la caña de azúcar y la determinación del volumen de biomasa aérea de la caña de azúcar y áreas pobladas de caña para realizar el reajuste del pronósticos de estimados productivos de la cosecha y producción de azúcar, a partir de su correlación con el desarrollo de mediciones en el campo.

2. METODOLOGIA

2.1. Localización del área de estudio

El área de investigación está ubicada en la región central de Cuba, en áreas dedicadas a la producción de caña de azúcar de la Empresa Agroindustrial Azucarera "Ciro Redondo" del municipio Primero de Enero de la provincia de Ciego de Ávila, en un área de 350 km², donde aproximadamente 225 km² son elaborados con caña de azúcar. Para el desarrollo de esta investigación se seleccionaron 30 campos para su estudio piloto, con el objetivo de establecer la metodología de trabajo que permita su extensión a otras zonas del país. Este municipio cuenta con más del 85% del suelo dedicado a la actividad agrícola con una topografía plana. La temperatura media anual oscila entre los 24 °C en las llanuras hasta los 26 °C y más en las costas orientales, con dos estaciones: verano (de mayo a octubre, coincidiendo con la época de lluvias), siendo julio y agosto los meses más calurosos; e invierno (comprende la estación seca), de noviembre a abril, siendo enero y febrero los meses más fríos, la precipitación promedio para toda Cuba es de 1 335 mm, existen eventos de sequía recurrentes, que pueden durar varios años.

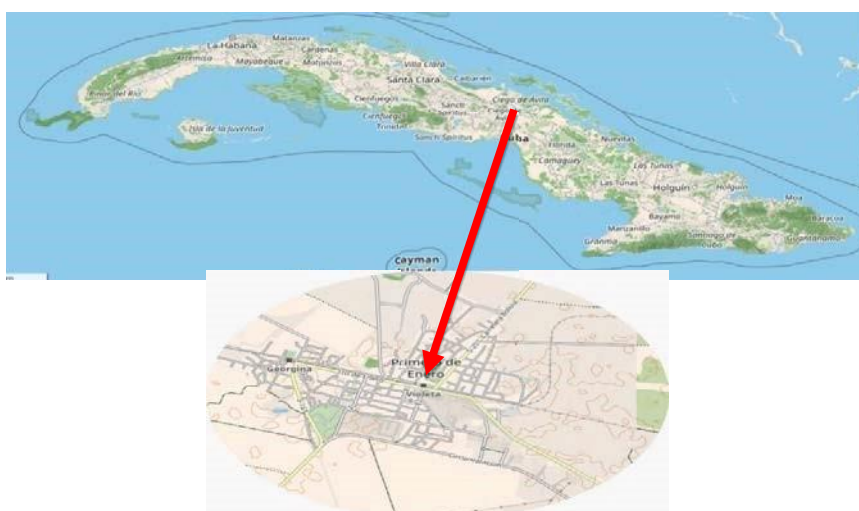


Figura 3. Área de investigación ubicada en el municipio Primero de Enero Provincia de Ciego de Ávila. Cuba.

2.2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.2.1 Materiales utilizados

Para el desarrollo de la investigación fueron necesario contar con los siguientes materiales, instrumentos y equipos:

- Red geodésica, coordenadas de puntos, datos geodésicos de los puntos,
- Mapas topográficos a escala 1. 10 000, 1.25 000;
- Mapas de uso y tenencia, fotografías aéreas,
- Levantamiento topográfico de los campos de caña, escala 1.5000,
- Cartografía topográfica y catastral especializada de los campos de caña
- Imágenes Google del área del proyecto, imágenes de satélite y radar, ortofotos,
- Cartografía del tipo de suelo,
- Cartografía del tipo de variedad de caña,
- Información climática - precipitación y temperatura,
- Tipo de riego,
- Equipos geodésicos y topográficos, GNSS, Estación Total, cinta métrica,
- Reglas estadimétricas, nivel geodésico y topográfico,
- Información sobre campos de caña,
- Informe de los trabajos de medición del pronóstico de cosecha de caña de los campos seleccionados.
- Informe sobre la determinación del volumen de biomasa en campos de caña de azúcar seleccionados mediante la metodología tradicional,
- Trabajos de medición de biomasa con imágenes de satélite, aéreas y VANT Software de procesamiento ENVI Y SNAP.
- Base de datos Scopus, Google académico
- Publicaciones de revistas internacionales especializadas
- Publicaciones en eventos internacionales sobre empleo de las tecnologías geoespaciales

2. Metodología empleada.

Como parte de la investigación, la determinación del estimado de biomasa de caña de azúcar, tiene su nivel elemental y primario en el campo de caña y diversos son los factores que determinan su cálculo: variedad o cepa, productividad, edad, nivel de fertilización, riego, atención cultural del cultivo, grado de enyerbamiento, análisis de las precipitaciones y temperaturas, población de las cepas, tallos, tipos de semillas, afectación por drenajes, otros, los cuales afectan los estimados de producción de caña, sobre cuya valoración existe amplia experiencia de los técnicos y productores, pero la cantidad de biomasa o población de caña que posee un campo dado y que constituye el parámetro de mayor incidencia, necesita ser medido, donde es imprescindible la cuantificación de las fuentes de error, no basta escoger un método suficientemente preciso y tomar las medidas necesarias para cometer errores mínimos en la ejecución de las mensuras. Siendo el objetivo

fundamental, estudiar las técnicas empleadas y determinar las mejoras y variantes tecnológicas necesarias para la actualización de la información cartográfica de los campos de caña, la determinación de la biomasa, población de caña, así como evaluar la posibilidad de introducir el empleo de las tecnologías geoespaciales y Geomática en el monitoreo, control y determinación de biomasa para la corrección de los estimados de rendimiento de la caña de azúcar.

Para el desarrollo de esta investigación exponemos los métodos, técnicas e instrumentos empleados para la recolección de los datos, así como las pruebas y parámetros utilizados, donde hemos diseñado un esquema general 2.1.1 para la organización de los trabajos expuestos en la Metodología propuesta y el alcance de los trabajos realizados.

2.1 Métodos para el desarrollo de la investigación.

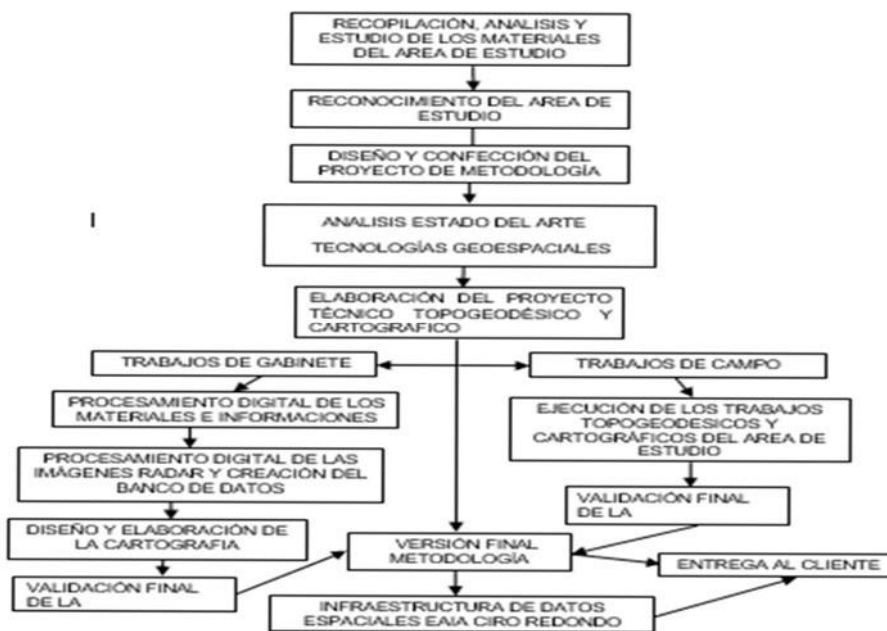
En este aspecto exponemos los aspectos generales a tener en cuenta el desarrollo de esta Metodología para la determinación del volumen de biomasa de caña de azúcar mediante el empleo de imágenes satelitales de radar. Contenido general de los trabajos:

1. Estudio, análisis y recopilación de materiales aerocartográficos, geodésicos, topográficos y demás información del área de estudio.
2. Diseño de la metodología para la determinación del volumen de biomasa de caña de azúcar mediante el empleo de imágenes satelitales de radar.
3. Elaboración del proyecto técnico Topogeodésico y de Cartografía del área de estudio.
4. Procesamiento digital de los materiales primarios e informaciones, producción de ortofotos, determinación de estándares de clasificación.
5. Diseño y elaboración de la cartografía temática 1:5000 de producción de biomasa en cañaverales del área de estudio.
6. Realización de mediciones de campo para verificar el crecimiento del cultivo de caña, población caña, la biomasa en los campos de caña seleccionados.
7. Procesamiento digital de imágenes de radar satelital obtenidas del área de estudio.
8. Validación de la propuesta metodológica para la determinación del volumen de biomasa de caña de azúcar utilizando imágenes de satélite Radar.
9. Presentación de la versión final de la metodología para la determinación del volumen de biomasa de caña de azúcar utilizando imágenes de satélite Radar.

El alcance para el desarrollo de esta 1era Etapa de investigación está dado por los trabajos siguientes:

1. Análisis y estudio de la documentación.
2. Compilación de los materiales aerocartográficos y geodésicos del área de estudio.
3. Realización del procesamiento digital de los materiales primarios, mediciones de los cultivos de caña de azúcar, levantamiento de los campos y establecimiento de los puntos de control fotogramétrico de los campos seleccionados, determinación y georreferenciación para la producción de ortofotos, clasificación de los cultivos.
4. Análisis Bibliométrico y revisión bibliográfica sistemática
5. Estudio y empleos de los métodos para la realización de los trabajos de campo para la medición de áreas y cultivos de caña.
6. Análisis de los resultados

2.1.1 Esquema general Metodología para la determinación del volumen de biomasa de caña de azúcar empleando imágenes satelitales de radar. Diseño propio.



2.2 Metodología para los trabajos de gabinete

Para el desarrollo de esta investigación fue necesario realizar los trabajos siguientes:

1. Estudio, análisis y compilación de los materiales aerocartográficos, geodésicos, topográficos y otras informaciones del área de estudio.
2. Diseño de la metodología para la determinación del volumen de biomasa de la caña de azúcar empleando imágenes satelitales de radar.
3. Elaboración del proyecto técnico para la ejecución de trabajos topogeodésicos y cartográficos del área de estudio.
4. Realización y procesamiento digital de los materiales primarios, producción de ortofotos, determinación de patrones de clasificación.

5. Diseño y elaboración de la cartografía temática 1:5000 de producción de biomasa de los campos de caña del área de estudio.

Para cumplimentar esta tarea fue necesario realizar:

1. Un análisis del estado del arte sobre el empleo de las imágenes satelitales de radar y las tecnologías empleadas para su procesamiento digital en las investigaciones relacionadas con la utilización de la Geomática en la agricultura.
2. Analizar de la experiencia internacional existente en este tipo de tecnología geoespacial para la determinación del volumen de biomasa de caña de azúcar.
3. Diseño de la metodología para la determinación del volumen de biomasa cañera empleando imágenes satelitales de radar.
4. Se elaboraron y ejecutaron los proyectos técnicos para el aseguramiento topogeodésico de la zona de estudio y su cartografía.
5. Se realizó la compilación y digitalización de los materiales aerocartográficos, geodésicos e informaciones del área de estudio.

2.2.1 Análisis Bibliométrico y Revisión Bibliográfica sistemática

Para dar cumplimiento a esta etapa, en la solución teórica del problema, empleamos los métodos de revisión bibliométrica y revisión bibliográfica sistemática que permiten realizar una evaluación de las publicaciones científicas a través de la recolección, análisis y estudio de las informaciones contenidas en los artículos, revistas y publicaciones científicas seleccionadas, relacionadas con el tema de investigación.

En este trabajo se utilizaron indicadores bibliométricos y de revisión sistemática para investigar, con un enfoque multidisciplinario y de alcance mundial, regional, nacional y local, cual ha sido el desarrollo sobre los conceptos, aplicaciones, metodologías y desarrollo de las tecnologías geoespaciales en la determinación del volumen de biomasa de la caña de azúcar empleando imágenes satelitales de Radar.

Siendo el objetivo de este trabajo, analizar la producción científica de los últimos 10 a 20 años en el referido tema de investigación a partir de la revisión bibliométrica en la base de datos Scopus, Google Escolar y de las revisiones sistemáticas de literatura sobre estas tecnologías, para su uso y aplicación en un contexto socioeconómico y cultural en la producción agroindustrial de la caña de azúcar, que permita sustentar su marco teórico y conceptual, y llegar a resultados concretos en esta investigación. En este análisis fueron abordadas las siguientes temáticas: Biomasa, Caña de Azúcar, Tecnologías Geoespaciales, Teledetección, Imágenes de Radar Satelital, Procesamiento Digital, Agricultura de Precisión, Metodología y Desarrollo Sostenible. Fig. 1 Etapas de análisis de la bibliografía,

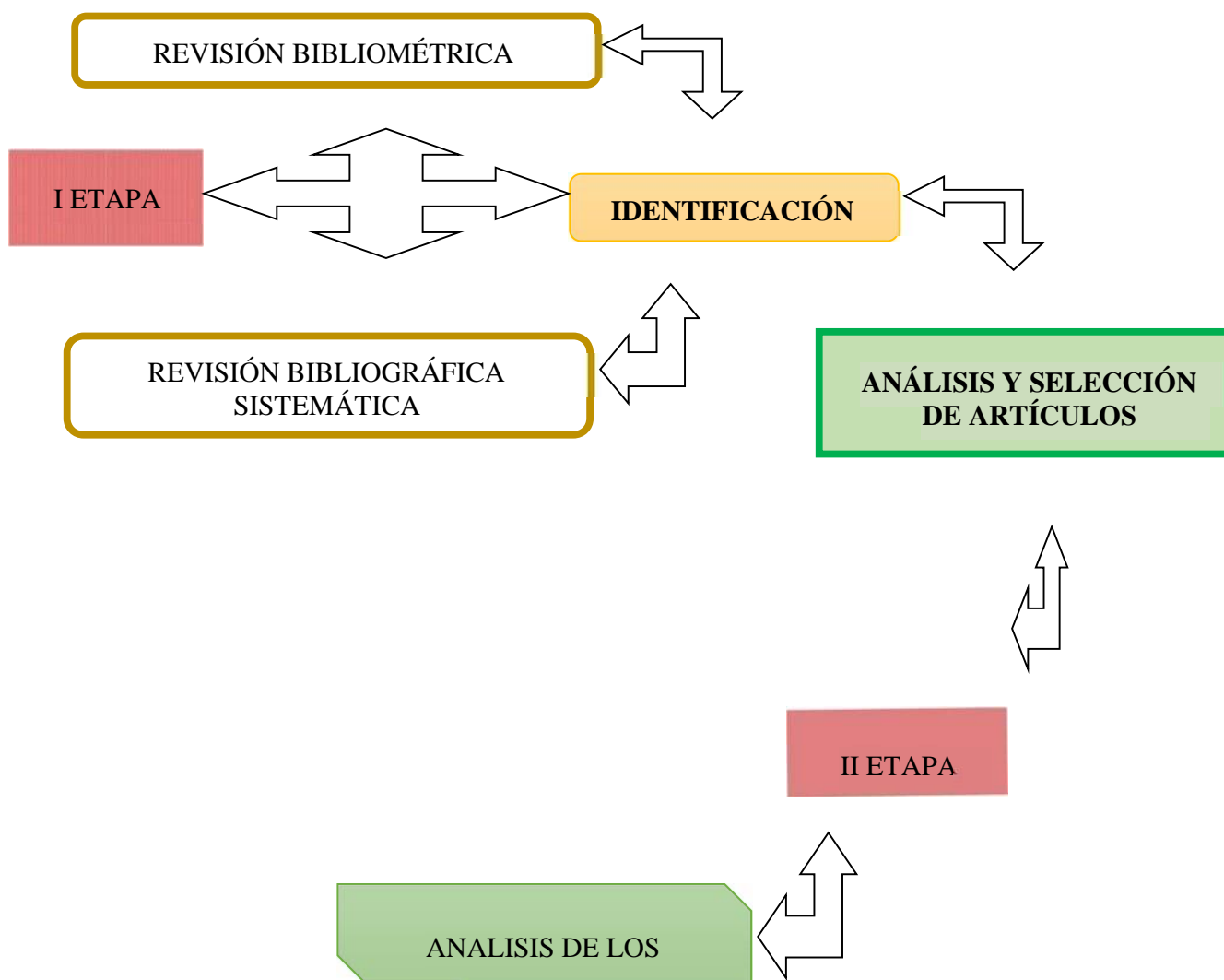


Figura 1. Etapas de análisis de la bibliografía.

2.2.2 Análisis de los resultados

En este estudio se analizaron en la base de datos Scopus 599 artículos y en cuatro revistas especializadas 582 artículos, en un periodo de 10 a 20 años, realizadas desde el año 1985 – 2010 al 2023, donde como resultado del análisis y filtrado por tema, año, país y palabras clave, se obtuvieron 298 artículos que se relacionan con el tema de investigación.



Figura 2. Línea del tiempo de análisis de la bibliografía.

Tabla 1. Temáticas y publicaciones

Temáticas	Cantidad de publicaciones
Ciencias Ambientales	59
Ciencias de la Tierra y Planetarias	56
Ciencias Agrarias y Biológicas	34
Ciencias Sociales	33
Ingeniería	18
Informática	9

Tabla 2. Artículos por temáticas

Artículos	Cantidad
Sensoramiento Remoto	70
Tecnologías Geoespacial	34
Imágenes de satélite	28
Uso de la Tierra	19
SIG	58
Cobertura del suelo	14
Lansat	13
Cartografía	12
Otros	22

Tabla 3. Resumen de revisión Bibliográfica

Revista	Volumen total	Cantidad Artículos	Año
Revista SELPER	40	286	1985 -2015

Sociedad Internacional de Fotogrametría y Percepción Remota (ISPRS)	14	70	2004 -2021
Asociación Española de Teledetección (AET)	1	10	2021
Sociedad Española de Cartografía, Fotogrametría y Teledetección	27	216	2007
TOTAL	82	582	

2.2.3 Métodos empleados para el desarrollo de los trabajos de compilación y digitalización de los materiales aerocartográficos, geodésicos e informaciones del área de estudio.

1. Digitalización de mapas

Este método fue empleado para llevar a cabo el escaneo y la digitalización de la base cartográfica existente del Catastro a escala 1: 10 000, ortofotomapas, fotos aéreas, Mapa Topográfico a escala 1:10000, e informaciones de los campos de caña seleccionados con vista a crear la base cartográfica de los campos de cañas para el desarrollo de las mediciones y el tratamiento a diferentes escalas.

En este caso el mapa se encuentra en formato digital donde todos los elementos son representados en un sistema de coordenadas con sus correspondientes X, Y, Z en un sistema CAD. Durante la edición de estos mapas digitales, se realiza la incorporación de la coordenada Z con ayuda de las herramientas aportadas por estos sistemas. Las coordenadas altimétricas de los puntos que abarcan la base topográfica a actualizar son necesarias fundamentalmente para poder crear la malla, las coordenadas X y Y también deben ser reales por lo que los datos deben estar georreferenciados.

2. Métodos fotogramétricos

Este método resulta económico, teniendo en cuenta el desarrollo alcanzado en esta esfera con los avances de la tecnología digital. Es posible densificar áreas extensas con el empleo de MDT digitales a partir de imágenes aéreas, empleando las posibilidades que brindan las estaciones fotogramétricas digitales existentes en GEOCUBA IC. El método fotogramétrico resulta eficiente y rápido, nos permite con las imágenes obtenidas visualizar, restituir y actualización de la información obtenida de levantamientos aéreo realizados.

3. Bases de datos existentes

Esta variante una vez obtenida toda la información existente se analizan y preparan el uso de bases de datos más dinámicas con el objetivo de interrelacionarlas con la cartografía de los de los campos de cañas.

2.3 Metodología para las mediciones en campo

Para el desarrollo de los trabajos de campo se emplearon métodos Geodésicos y Topográficos para densificar directamente en campo con el empleo de instrumentos topogeodésicos o mediante técnicas

GNSS o la combinación de ambos el establecimiento de puntos que sirvan de apoyo para la obtención de la cartografía y georreferenciación de los campos de cañas, población de caña, fertilización y riego del cultivo. Generalmente se emplean en zonas no muy extensas y de difícil configuración del terreno. Es el método más preciso, pero a su vez el más costoso.

2.3.1 Para el desarrollo de esta investigación se hizo necesario realizar los trabajos siguientes:

1. Realización del procesamiento digital de los materiales primarios, mediciones de los cultivos de caña de azúcar, levantamiento de los campos y establecimiento de los puntos de control fotogramétrico de los campos seleccionados, determinación y georreferenciación para la producción de ortofotos, clasificación de los cultivos.
2. Realización de las mediciones de verificación de biomasa, área y población de caña de los campos de caña seleccionados.
3. Análisis de los resultados de las mediciones

2.3.2 Para el desarrollo de esta investigación fue necesario realizar los trabajos de campo siguientes:

El control del crecimiento del cultivo se realizó para determinar la efectividad de las mediciones de campo. Para ello se empleó el método de distribución diagonal doble o en X (Flores, 2006), para lo cual se tomaron nueve puntos experimentales en los campos seleccionados, los cuales fueron georreferenciados mediante receptores GNSS, para una precisión de 0,5 m. Las variables controladas en las plantas fueron: ancho de la hoja, diámetro del tallo, altura del tallo y diámetro del follaje de las hojas.



Figura 4. Campo seleccionado para el monitoreo de campo, método de distribución diagonal doble o en X. Base metodológica propuesta (Flores, 2006).

Además, se realizó la medición de la humedad del suelo y espesor de la cobertura vegetal. Para la determinación de las dimensiones de la planta y la cobertura del suelo se tomaron ocho muestras en cada punto experimental y se realizaron cuatro repeticiones, para ello se empleó la cinta métrica, la regla graduada y el calibrador vernier con apreciación de 1 mm y 0,05 mm respectivamente (Fig. 5a y 5b).



Figura 5. Mediciones de los parámetros del cultivo y la humedad. Base metodología propuesta (Flores, 2006).

Las mediciones de humedad se realizaron en el camellón próximo a la cepa de caña (Fig. 5c), realizándose en cada punto experimental, cuatro mediciones a una profundidad de 0 a 10 cm. La humedad de las muestras se determinó en el laboratorio, según lo establecido en la norma NC 3437:2003.

Para el desarrollo de las mediciones de campo se hizo necesario realizar el proyecto de aseguramiento topogeodésico con la finalidad de que estos puntos de control sirvan de base para realizar la red geodésica de apoyo y una vez determinadas las coordenadas de los puntos de control con los receptores GNSS, y a su vez sirvan de apoyo en la medición de coordenadas de los puntos de control fotográfico para ortorectificar los modelos, realizar el levantamiento de los campos seleccionados con estación total, con el objetivo de obtener la cartografía de los campos seleccionados a escala 1:5000 y la georreferenciación de las imágenes satelitales empleadas para

el procesamiento, corrección radiométrica y topográfica de las imágenes satelitales empleadas, así como los trabajos de validación de estos procesos en esta metodología.

2.3.2.1 Requerimientos a tener en cuenta para la determinación de los puntos de control fotogramétrico

Los puntos de control fotográficos permiten georreferenciar la imagen fotográfica o satelital con respecto al sistema geodésico nacional empleado, este proceso es conocido como orientación exterior o absoluta permitiendo el escalado y nivelado de la imagen a partir de los datos conocidos de las coordenadas de los puntos en el sistema geodésico referido a procesar las imágenes obtenidas.

Los puntos de control son empleados durante la rectificación digital de las imágenes, por lo que es preciso conocer su posición planimétrica con exactitud, para lo cual se deben preparar de antemano los croquis con el punto donde se debe posicionar el instrumento elegido para obtener las coordenadas planimétricas y altura del mismo. En la actualidad son ampliamente utilizadas las mediciones con receptores GNSS, en modo diferencial con postprocesamiento para la obtención de coordenadas precisas, con el inconveniente de que se debe crear el modelo del geoide para la superficie seleccionada.

Especial cuidado debe tomarse cuando la selección del número de puntos de control, su calidad y distribución afecta el resultado de la rectificación. Las reglas siguientes deben permitir asegurar una correcta selección de los puntos de control en tierra:

- Los puntos deben ser fácilmente identificables, tanto sobre la imagen como en el mapa y el terreno (o las coordenadas GNSS deben estar disponibles).

- Formas artificiales simétricas con buen contraste sobre el fondo deben ser utilizadas siempre y cuando sea posible (Ej.: Intersección de carreteras, elementos pequeños que ofrezcan seguridad). Se deben evitar formas naturales transitorias tales como bordes de bosques y cuerpos de agua.
- La exactitud del mapa a partir del cual los puntos de control sean tomados debe ser comparable con la resolución espacial del sensor. Los puntos de control terrestre deben ser ubicados con una precisión del 20% del tamaño del pixel.
- Es recomendable seleccionar los puntos en forma de racimos de tres según recomendaciones del proveedor, lo más uniformemente distribuidos en toda el área que abarca la imagen.
- La cantidad recomendada es de 40 puntos para 100 km², es decir debe quedar aproximadamente un punto cada 3 km. Para el tratamiento correcto de estas imágenes la precisión de las coordenadas obtenidas con receptores GNSS, debe ser decimétrica con un espaciado de 3 a 4 Km.

Es importante archivar las coordenadas obtenidas de los puntos GNSS, juntamente con los croquis. Las coordenadas obtenidas se deben referir al Datum y a la proyección nacional con la precisión requerida. Con las informaciones obtenidas de los puntos, se generará un fichero con un editor de texto o sobre Excel con la información de cada uno de ellos, número, coordenadas X, coordenada Y, coordenada Z, otras informaciones. La forma de codificarlo estará en función del sistema que reciba esta información.

2.4. Configuración de la proyección cartográfica

La base matemática está compuesta de elementos como: la proyección cartográfica, el sistema de coordenadas, el elipsoide de referencia y el Datum nacional.

Todos estos parámetros son relativos a la representación de la información de la superficie terrestre en una superficie plana o en un mapa para el territorio nacional, el conocimiento relativo a los mismos resulta importante para evitar la propagación de errores en el manejo de la información fotográfica. Toda la información determinada, está referida a la proyección oficial de Cuba.

Las imágenes satelitales generalmente no están georreferenciadas a una proyección cartográfica dada o en muchas ocasiones están referidas a una proyección cartográfica que no es igual a la de Cuba, por lo que en estos casos es preciso contar con estos parámetros para poder transformar de un sistema a otro, teniendo en cuenta los mismos. Una incorrecta definición de los mismos puede provocar distorsiones en el posicionamiento geográfico.

Esta transformación se realiza a través del programa de procesamiento digital con que se trabaje para de esta forma garantizar la georreferenciación de las imágenes con las coordenadas del terreno.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultado del análisis bibliométrico y revisión bibliográfica sistemática

En este trabajo se presentan en esta primera etapa, los resultados obtenidos en el análisis Bibliométrico y revisión Bibliográfica sistemática, que permiten realizar una evaluación de las publicaciones científicas a través de la recolección, análisis y estudio de las informaciones contenidas en los diferentes artículos científicos seleccionados, con un enfoque multidisciplinario y de alcance mundial, regional, nacional y local, sobre los conceptos, empleos, aplicaciones, metodologías y

desarrollo tecnológico de las tecnologías geoespaciales para determinar el volumen de biomasa y monitoreo de caña de azúcar empleando imágenes satelitales de radar.

Como parte del análisis realizado en esta primera etapa de la producción científica de los últimos 10 a 20 años, a partir de la revisión Bibliométrica en la base de datos Scopus, Google escolar y de las revisiones Bibliográfica sistemática de artículos científicos, literatura, tesis de grado, eventos científicos sobre estas tecnologías, se llevó a cabo una evaluación de su uso y aplicación en un contexto socioeconómico y cultural en la gestión y producción agroindustrial de la caña de azúcar, que permita sustentar su marco teórico y conceptual y llegar a resultados concretos en esta investigación, para lo cual fueron revisados más de 1181 entre artículos, revistas y documentos, concluyéndose que existe poca información relacionada con el tema "Análisis y empleo de imágenes satelitales de radar para determinar biomasa de la caña de azúcar", tanto a nivel internacional, regional y local, específicamente en Cuba.

3.2 Resultado de las mediciones en el campo

En el seguimiento a la evolución de los indicadores fenológicos del cultivo mediante las mediciones realizadas en campo, se aprecia un incremento limitado de los mismos desde la cosecha hasta el mes de abril (Figs. 4 y 5). En este sentido, se puede apreciar que a partir de esta fecha tiene lugar un incremento gradual del ancho de la hoja, el diámetro y la altura del tallo. Este incremento se hace más evidente en las mediciones realizadas a la altura del tallo. Estos tres indicadores muestran un patrón similar hasta los nueve meses del cultivo, a partir del cual tiene lugar una disminución gradual.

La cobertura del suelo tiene su valor máximo después de la cosecha, como resultado del proceso de limpieza que realiza la cosechadora durante el corte (Aguilar-Pardo *et al.*, 2016). Los fragmentos de hojas y cogollos alcanzan una altura promedio 5,6 cm, formando una capa de residuos distribuidos parcialmente uniformes sobre el suelo. En el segundo mes del cultivo se aprecia una reducción de la cobertura como resultado del primer cultivo mecanizado, posteriormente la reducción de la cobertura tiene lugar de forma gradual, como parte del proceso de descomposición con el aumento de la humedad del suelo. Una nueva disminución de la cobertura tiene lugar en el mes siete del cultivo, causado por la segunda operación de cultivo mecanizado lo cual reduce hasta un valor de 0,2 cm la capa superficial sobre el suelo.

Las mediciones realizadas a la humedad del suelo durante todo el crecimiento del cultivo (Fig. 5), muestran el tránsito del período seco al lluvioso, imponiendo dos condiciones fundamentales de humedad para el cultivo. El valor promedio de la humedad en los primeros cuatro meses del cultivo fue de 27,9 %, provocado por la ausencia de precipitaciones, lo que redujo la disponibilidad de los micronutrientes y minerales en el suelo y con ello el crecimiento de los nuevos retoños.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo de esta investigación en esta primera etapa, nos permitió centrarnos en el alcance de los trabajos siguientes:

1. Análisis y estudio de la documentación.
2. Se realizó la compilación de los materiales aerocartográficos y geodésicos del área de estudio.
3. Realización del procesamiento digital de los materiales primarios, mediciones de los cultivos de caña de azúcar, levantamiento de los campos y establecimiento de los puntos de control fotogramétrico de los campos seleccionados, determinación y georreferenciación para la producción de ortofotos, clasificación de los cultivos.

4. Análisis Bibliométrico y revisión bibliográfica sistemática

5. Resultados de la investigación de los trabajos de campo.

Teniendo en cuenta el análisis realizado en esta primera etapa de la producción científica de los últimos 10 a 20 años, a partir de la revisión bibliométrica en la base de datos Scopus, Google escolar y de las revisiones sistemáticas de la literatura, tesis de grado, eventos científicos sobre estas tecnologías, donde permitió llegar a resultados concretos en esta investigación, para lo cual fueron revisados más de 1181 entre artículos, revistas y documentos, concluyéndose que existe poca información relacionada con el tema "Análisis y empleo de imágenes satelitales de radar para determinar biomasa de la caña de azúcar", tanto a nivel internacional, regional y local, específicamente en Cuba.

Para el desarrollo de esta metodología y su aplicación práctica en la determinación de la biomasa cañera, se hicieron mediciones de campo directamente en el cultivo de la caña de azúcar, para realizar monitoreo y control del crecimiento del cultivo, determinar la efectividad de las mediciones de campo. Para ello se empleó el método de distribución diagonal doble o en X (Flores, 2006), donde se tomaron nueve puntos experimentales en los campos seleccionados, los cuales fueron georreferenciados mediante receptores GNSS, con una precisión de 0,5 m. Las variables controladas en las plantas fueron: ancho de la hoja, diámetro del tallo, altura del tallo y diámetro del follaje de las hojas.

En el seguimiento a la evolución de los indicadores fenológicos del cultivo mediante las mediciones realizadas en el campo, se aprecia un incremento limitado de los mismos desde la cosecha hasta el mes de abril (Figs. 4 y 5). En este sentido, se puede ver que a partir de esta fecha tiene lugar un incremento gradual del ancho de la hoja, el diámetro y la altura del tallo. Este incremento se hace más evidente en las mediciones realizadas a la altura del tallo. Estos tres indicadores muestran un patrón similar hasta los nueve meses del cultivo, a partir del cual tiene lugar una disminución gradual.

Los trabajos de campo y los estudios realizados en el cultivo de la caña en su estado vegetativo, permitió conocer y analizar todos los factores que intervienen en su crecimiento, población, biomasa, área no caña, análisis del estimado de zafra, mediante el empleo de los métodos tradicionales de medición y monitoreo, haciéndose este proceso de obtención de la información de campo muy trabajoso y costoso, por lo que es necesario la combinación e integración de las tecnologías y herramientas geomáticas en la recopilación, procesamiento de la información para la estimación y planificación de la cosecha y producción de azúcar.

De acuerdo con los resultados obtenidos en esta primera etapa de investigación, plantear que por ser la primera vez que se realiza un análisis para introducir esta tecnología, constituyendo un tema novedoso y de alto impacto económico para el país, por lo cual recomendamos crear una infraestructura tecnológica que nos permita su integración, empleo y desarrollo de las tecnologías geoespacial en el monitoreo y determinación de biomasa de la caña de azúcar con imágenes satelitales de radar y continuar trabajando en su investigación para su implementación y desarrollo en Cuba.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

5.1 Referencias bibliográficas

AGUILAR, P. A.; PÉREZ, J. A.; AGUILAR, D.: "Nuevos paradigmas en la cosecha de la caña para el uso sustentable de toda la biomasa en las bioeléctricas. Parte I", *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. 50 (3): 3-8, 2016. ISSN:0138-6204.

ALVAREZ, A.: Consideraciones económicas sobre algunas de las principales prácticas agronómicas en caña de azúcar (Álvarez, 2014).

FLORES, J. R. N.: *Diseño experimental: Aplicaciones en agricultura*, 316 pp., Costa Rica, Editorial UCR, 2006, ISBN: 9789-9776-78900.

GILABERT, M. A.; GONZÁLEZ, J.; GARCIA, F. J.; MELIÁ, J: "A generalized soil-adjusted vegetation index.", *Remote Sensing of Environment*, vol. 82 (1): 303-310, 2002. ISSN: 1879-0704.

GUTIERREZ, S. K.; SANTANA, L. H.; MORALES, R. O; O. DÍAZ, A. MORA, I. D.: "Análisis de imágenes multiespectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados en agricultura de precisión", *Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, vol. 39 (2): 2018. ISSN: 1815-5928.

HERNANDEZ VIGOA, R; ORIA MARTIN, R. J; RODRÍGUEZ, GÁLVEZ, G.; URQUIZA, DE ARMAS, R.; OLIVERA, ESPINOSA, R.; MÉNDEZ, LEÓN, A. (1987). "La caña de azúcar en Cuba", pág. 12,13.). La Habana. Editorial Científico Técnica. Ministerio de Cultura.

HATFIELD, J. L. PRUEGER, J. H.; SAUER, T. J.; DOLD, C.; O'BRIEN, P; WACHA, K.: "Applications of Vegetative Indices from Remote Sensing to Agriculture: Past and Future", *Inventions*, vol. 4 (4): 71, 2019. ISSN: 2411-5134.

KHARUF, G. S.; HERNÁNDEZ, L.; OROZCO, R.; ADAY, O. D. L. C.; DELGADO, M. I.: "Análisis de imágenes multiespectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados", *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, vol. 39 (1): 79-91, 2018. ISSN: 1815-5928.

NC 3437:2003: *Máquinas Agrícolas y Forestales. Metodología para la determinación de las condiciones de ensayo.*, Vig. Septiembre 2003. ONN.

ROSELL, P. R.; RAMÍREZ, A: "Evaluación de la frescura de la caña de azúcar para minimizar pérdidas industriales (Original)", *Redel. Revista Granmense de Desarrollo Local*, vol. 5 (2): 107119, 2021. ISSN: 2664-3065.

SEGARRA, J.; BUCHAILLOT, M. L.; JARAUS, L. KEFAUVER, S. C.: "Remote Sensing for Precision Agriculture: Sentinel-2 Improved Features and Applications", *Agronomy*, vol. 10 (5): 641, 2020.ISSN:2073-4395.

S. K. SISHODIA, R. P.; RAY, R. L. SINGH: "Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture: A Review", *Remote Sensing*, vol. 12 (19): 31-36, 2020. ISSN: 1879-0704.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.: *Fisiología vegetal*, Universitat Jaume I, 2006, ISBN: 9788480216012.

TRIANAFYLLOU, A.; SARIGIANNIDIS, P.; BIBI, S.: "Precision Agriculture: A Remote Sensing Monitoring System Architecture", *Information*, vol 10 (11): 348-354, 2019. ISSN: 20782489.

WANG, F.; HUANG, J.; CHEN, L.: "Development of a vegetation index for estimation of leaf area index based on simulation modeling", *Journal of Plant Nutrition*, vol. 33(3):328-338 2010. ISSN: 0190-4167.