



FACULTAD DE INGENIERIA GEOGRAFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

CONCENTRACIÓN DE LOS NITRATOS DEL SUELO PARA CULTIVOS DE MAÍZ,
CENTRO POBLADO MAYHUASI, DISTRITO DE BAMBAMARCA, PROVINCIA
DE HUALGAYOC –CAJAMARCA 2021

Línea de investigación:

Procesamiento digital de imágenes y señales

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo

Autora:

Cercado Walter, Rosa Elizabeth

Asesora:

Zúñiga Díaz, Walter Benjamín

ORCID: 0000-0001-6860-7456

Jurado:

Zamora Talaverano, Noe Sabino

Guillen León, Rogelia

Cesar Minga, Julio

Lima - Perú

2022

Referencia:

Cercado, W. (2022). *Concentración de los nitratos del suelo para cultivos de maíz, centro poblado Mayhuasi, distrito de Bambamarca, Provincia de Hualgayoc-Cajamarca 2021* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio Institucional UNFV. <http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/5847>



Reconocimiento - No comercial - Sin obra derivada (CC BY-NC-ND)

El autor sólo permite que se pueda descargar esta obra y compartirla con otras personas, siempre que se reconozca su autoría, pero no se puede generar obras derivadas ni se puede utilizar comercialmente.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



Universidad Nacional
Federico Villarreal

VRIN | VICERRECTORADO
DE INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA AMBIENTAL Y ECOTURISMO

CONCENTRACIÓN DE LOS NITRATOS DEL SUELO PARA CULTIVOS
DE MAÍZ, CENTRO POBLADO MAYHUASI, DISTRITO DE
BAMBAMARCA, PROVINCIA DE HUALGAYOC –CAJAMARCA 2021

Línea de Investigación:
Procesamiento digital de imágenes y señales

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo

Autora:

Cercado Walter, Rosa Elizabeth

Asesor:

Zúñiga Díaz, Walter Benjamín
(ORCID: 0000-0001-6860-7456)

Jurado:

Zamora Talaverano, Noe Sabino
Guillen León, Rogelia
Cesar Minga, Julio

Lima – Perú
2022

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios el dador de la vida y la fuente de todas las cosas, quien permitió que a pesar de todas las adversidades pueda culminar con este trabajo de investigación, a mi hija Killari y mi esposo, mis padres y hermanas quienes son mi motivación y lo más hermoso que Dios me ha dado.

Agradecimiento

A mi casa de estudios la Universidad Nacional Federico Villarreal a la Facultad de Ingeniería Geográfica Ambiental y Ecoturismo por la formación profesional de Ingeniero Geógrafo.

A mi asesor el Mag. Ing. Walter Benjamín Zúñiga Díaz, por todos los buenos consejos que supo darme, por su amistad y consideración en todo el proceso de la investigación.

Al Mag. Ing. Geog. Rubén Martínez Cabrera, por su tiempo y dedicación en la revisión de mi tesis. Gracias por los conocimientos impartidos y apoyo desinteresado.

A mi esposo quien me acompañó en todo el proceso, su apoyo en los trabajos de campo y su disposición en cada detalle que fuera necesario.

A mis padres Gilberto y Nérida por sus enseñanzas, consejos y por estar pendientes en todo el proceso de mi formación académica.

A mis hermanas Ingrit y Melany por su motivación y apoyo incondicional en todo momento.

Índice

I.	Introducción	13
1.1.	Descripción y formulación del problema	15
1.1.1.	Problema principal	16
1.1.2.	Problemas secundarios	17
1.2.	Antecedentes	17
1.2.1.	Antecedentes nacionales	17
1.2.2.	Antecedentes internacionales	19
1.3.	Objetivos	21
1.3.1.	Objetivo general	21
1.3.2.	Objetivos específicos	21
1.4.	Justificación.....	21
1.4.1.	Implicaciones prácticas	21
1.4.2.	Relevancia social	22
1.4.3.	Valor teórico	22
1.5.	Hipótesis.....	22
1.5.1.	Hipótesis general.....	22
1.5.2.	Hipótesis específicas	23
II.	Marco teórico	24
2.1.	Bases teóricas sobre el tema de investigación.....	24
2.1.1.	Teledetección	24
2.1.2.	Espectro electromagnético	25
2.1.3.	Firmas espectrales	27
2.1.4.	Imágenes satelitales	29
2.1.5.	Misión Sentinel	30

2.1.6.	Índices de vegetación.....	32
2.1.7.	El suelo.....	34
2.1.8.	Sistema de información geográfica.....	39
2.1.9.	Geoestadística	40
2.1.10.	Diseño descriptivo	40
2.1.11.	Distribución normal	41
2.1.12.	Coefficiente de correlación R de Pearson.	43
2.1.13.	Análisis de regresión.....	46
III.	Método	47
3.1.	Tipo de investigación	47
3.2.	Variables.....	47
3.3.	Población y muestra	49
3.4.	Ámbito temporal y espacial.....	49
3.4.1.	Temporal.....	49
3.4.2.	Espacial	49
3.4.3.	Población.....	49
3.4.4.	Muestra	49
3.5.	Instrumentos	49
3.5.1.	Información temática y satelital.....	49
3.5.2.	Información cartográfica.....	50
3.5.3.	Programas (software).....	50
3.5.4.	Materiales.....	50
3.5.5.	Equipos	50
3.6.	Procedimientos	50
3.6.1.	Procedimientos para la identificación y cuantificación de parcelas con cultivos de maíz en el centro poblado Mayhuasi.....	52

3.6.2.	Procedimientos para la determinar la concentración de nitratos en el suelo en puntos específicos de parcelas representativas	55
3.6.3.	Procedimientos para realizar el diagnóstico comparativo preliminar del NDVI utilizando imágenes de satélite Sentinel	62
3.6.4.	Procedimientos para la elaboración de un modelo matemático que permita determinar la concentración de nitratos depositados en el suelo	64
3.7.	Análisis de datos.....	68
3.7.1.	Análisis cartográfico	68
3.7.2.	Análisis geoestadístico.....	69
IV.	Resultados.....	78
4.1.	Identificación y cuantificación de parcelas con cultivos de maíz en el centro poblado Mayhuasi.....	79
4.2.	Determinación de la concentración de nitratos en el suelo en puntos específicos de parcelas representativas	82
4.2.1.	Análisis de laboratorio	82
4.3.	Diagnóstico comparativo preliminar del NDVI utilizando imágenes de satélite Sentinel	83
4.3.1.	Vegetación nula (NDVI 0 - 0.25)	85
4.3.2.	Vegetación dispersa (NDVI 0.25 -0.4)	85
4.3.3.	Vegetación abundante y vigorosa (NDVI 0.4 -0.7).....	85
4.3.4.	Vegetación muy densa y vigorosa (NDVI >0.7)	85
4.4.	Elaboración de un modelo matemático que permita determinar la concentración de nitratos depositados en el suelo y los cultivos de maíz en el centro poblado Mayhuasi	88
4.4.1.	Modelo 1	88
4.4.2.	Modelo 2.....	88
V.	Discusión de resultados.....	95

VI. Conclusiones	97
VII. Recomendaciones	99
VIII.Referencias.....	101
IX. Anexos	109
Anexo A Solicitud de información para la Agencia agraria Hualgayoc.....	109
Anexo B Oficio de respuesta n° 68 – 2020 GR.CAJ-DRA/AAH-B	110
Anexo C Producción agrícola de maíz amiláceo del sector estadístico Frutillo.....	111
Anexo D Resultados de Laboratorio de las muestras de suelo	112
Anexo E Mapa base del área de estudio	113
Anexo F Mapa de ubicación del área de estudio	114

Índice de tablas

Tabla 1 División del espectro electromagnético	25
Tabla 2 Resolución espacial del satélite Sentinel-2	32
Tabla 3 Absorción de nutrientes (%) durante el ciclo vegetativo de maíz	38
Tabla 4 Valores del coeficiente de correlación	44
Tabla 5 Variable Independiente	48
Tabla 6 Variable Dependiente.....	48
Tabla 7 NDVI y NO ₃ de 0-30 cm de profundidad del suelo.....	69
Tabla 8 NDVI y NO ₃ de 30-60 cm de profundidad del suelo.....	69
Tabla 9 Test de normalidad para NDVI.....	70
Tabla 10 Test de normalidad para nitratos (NO ₃).....	72
Tabla 11 Correlación NDVI y NO ₃ para muestras 0-30 cm de profundidad.....	74
Tabla 12 Correlación NDVI y NO ₃ para muestras 30-60 cm de profundidad.....	75
Tabla 13 Parcelas de maíz del centro poblado Mayhuasi	79
Tabla 14 Resultados de laboratorio del análisis de las muestras de suelo	82
Tabla 15 Cantidad de nitrógeno inorgánico	83
Tabla 16 Porcentaje por área para intervalos de NDVI	85
Tabla 17 Modelos matemáticos que determinan la concentración de nitratos	89
Tabla 18 Concentración de nitratos usando el modelo ajustado.....	91
Tabla 19 Concentración de nitratos por clases y áreas que representan	92

Índice de figuras

Figura 1 Flujo de radiación en función a su origen	24
Figura 2 El espectro electromagnético.....	27
Figura 3 Necesidades de nutrientes del maíz (%).....	39
Figura 4 Coeficiente de correlación de Karl Pearson	44
Figura 5 Descarga de imágenes satelitales Sentinel 2	51
Figura 6 Combinación de bandas para generar un ráster en color natural.....	53
Figura 7 Generación de ráster de principales componentes de la imagen satelital.....	53
Figura 8 Reclasificación ráster de principales componentes	54
Figura 9 Vista del centro poblado Mayhuasi	55
Figura 10 Integración cartográfica y análisis espacial para determinar áreas homogéneas ...	56
Figura 11 Zonas homogéneas y distribución de puntos de muestreo	58
Figura 12 Puntos de muestreo georreferenciados en la imagen satelital	59
Figura 13 Toma de muestras del punto "A"	60
Figura 14 Toma de muestras del punto "B"	61
Figura 15 Toma de muestras del punto "C"	61
Figura 16 Toma de muestras del punto "D"	62
Figura 17 Calculadora ráster para determinar el NDVI.....	63
Figura 18 Reclasificación de la capa ráster del NDVI.....	64
Figura 19 Calculadora ráster para aplicar el modelo 1	65
Figura 20 Reclasificación para la concentración de nitratos en parcelas de maíz.....	66
Figura 21 Procedimientos realizados en la investigación.....	67
Figura 22 GDB con información cartográfica	68
Figura 23 Distribución normal de datos NDVI	71
Figura 24 Distribución normal de datos NO ₃ para suelos de 0-30 cm de profundidad	72

Figura 25 Distribución normal de datos NO_3 para suelos de 30-60 cm de profundidad	73
Figura 26 Regresión polinomial - NDVI y NO_3 de 0-30 cm de profundidad del suelo.	76
Figura 27 Regresión polinomial - NDVI y NO_3 de 30-60 cm de profundidad del suelo	76
Figura 28 Ráster de los principales componentes de la imagen satelital	80
Figura 29 Mapa de identificación y cuantificación de parcelas de maíz	81
Figura 30 Capa ráster preliminar del NDVI para el centro poblado Mayhuasi	84
Figura 31 Mapa preliminar del NDVI	87
Figura 32 Concentración de nitratos en el suelo para el centro poblado Mayhuasi	90
Figura 33 Parcela de maíz con mayor concentración de nitratos	93
Figura 34 Mapa de concentración de los nitratos del suelo en las parcelas de maíz	94

Resumen

El objetivo principal de la presente investigación es determinar la concentración de los nitratos del suelo para cultivos de maíz en el centro poblado de Mayhuasi, distrito de Bambamarca, provincia de Hualgayoc – Cajamarca. La concentración de los nitratos del suelo se determinó mediante el uso de un modelo matemático que se construye con información del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) obtenida del procesamiento de la imagen satelital Sentinel y los resultados de la concentración de nitratos de las muestras del suelo analizadas en un laboratorio. La metodología usada en la determinación de la concentración de los nitratos del suelo combina los trabajos de campo y gabinete con la aplicación del análisis geoestadístico, lo que permitió validar los datos y determinar una relación sitio píxel, con ello se obtuvo dos modelos matemáticos, de los cuales solo uno logró cumplir con la precisión mínima estadística. Posteriormente se ejecutó el modelo y se obtuvo la concentración de los nitratos en las 173 parcelas de maíz del centro poblado Mayhuasi. Se llegó a la conclusión que el modelo matemático elaborado sí puede determinar la concentración de nitratos y además de ello se pueden establecer zonas que presenten problemas de concentración de nitratos, hasta un 99.99% de nivel de confianza y una significancia de 0.04 (Modelo 1), que emplea el NDVI, en el estrato de profundidad de 0-30 cm.

Palabras claves: concentración de nitratos del suelo, imagen satelital Sentinel, NDVI, análisis geoestadístico.

Abstract

The main objective of this research is to determine the concentration of soil nitrates for corn crops in the Mayhuasi Town Center, district of Bambamarca, province of Hualgayoc - Cajamarca. The concentration of nitrates in the soil was determined by using a mathematical model that is constructed with information from the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) obtained from the processing of the Sentinel satellite image and the results of the nitrate concentration of the samples. soil analyzed in a laboratory. The methodology used in determining the concentration of soil nitrates combines field and office work with the application of geostatistical analysis, which allowed to validate the data and determine a pixel site relationship, with this, two mathematical models were obtained, from which only one of them managed to meet the minimum statistical precision. Subsequently, the model was run and the concentration of nitrates was obtained in the 173 corn plots of the Mayhuasi town center. It was concluded that the mathematical model elaborated if it can determine the concentration of nitrates and in addition to that, zones that present problems of nitrate concentration can be established, up to a 99.99% confidence level and a significance of 0.04 (Model 1), which uses NDVI, in the 0-30 cm depth stratum.

Keywords: soil nitrate concentration, Sentinel satellite image, NDVI, geostatistical analysis.

I. Introducción

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el nitrógeno es fundamental para el crecimiento vegetativo; les da el color verde intenso a las plantas, activa el rápido crecimiento, aumenta la producción de hojas, mejora la calidad de las hortalizas, constituyente de la clorofila que permite la fotosíntesis y es un componente de ácido ribonucleico (ARN) y el Ácido desoxirribonucleico (ADN). Su deficiencia provoca bajos rendimientos, débil macollamiento en cereales, madurez prematura, hojas de color verde claro o amarillento entre otras.

La superficie cultivada de maíz amiláceo en la región de Cajamarca fue de 25 076 ha., ocupando el segundo lugar después del trigo con 27 558 ha. Considerando que Cajamarca es una de las regiones con potencial en la producción de maíz. (Ministerio de agricultura, 2018-2019)

El sector estadístico el Frutillo que comprende al centro poblado Mayhuasi (área de estudio) se cultiva el maíz amiláceo y registra información del espacio que ocupan los sembríos y la producción de las últimas cinco campañas, siendo en promedio 260 h con 600 kg/ha. (Agencia agraria Hualgayoc, 2020)

Un estudio temprano del nivel de nitrógeno permitirá determinar la dosis del fertilizante N que fuera necesaria para optimizar el rendimiento y así mejorar las cosechas. En los últimos años, gracias a las tecnologías implementadas, como la teledetección, nos permite evaluar y monitorear los recursos naturales en menor tiempo y con facilidad, un ejemplo de ello son las imágenes satelitales Sentinel.

El presente estudio denominado “Concentración de los nitratos del suelo para cultivos de maíz, centro poblado Mayhuasi, distrito de Bambamarca, provincia de Hualgayoc – Cajamarca 2021, evaluará la información resultante del análisis del Índice de Vegetación de diferencia Normalizada (NDVI) obtenido del procesamiento de imágenes satelitales Sentinel

tomadas desde el espacio con un sensor multiespectral en el espectro visible e infrarrojo cercano y con los datos obtenidos del análisis de muestras de suelos para concentración de nitratos permitirá determinar el estado nutricional del maíz en sus primeras etapas cuando todavía se pueda incorporar un fertilizante nitrogenado; el mismo que se validará con la elaboración de un modelo matemático que permitirá obtener la concentración de nitratos en todas las parcelas de maíz del centro poblado Mayhuasi.

El estudio consta de 9 capítulos que se detallan a continuación:

En el primer capítulo se describe y formula el problema de investigación, se revisa los antecedentes a nivel internacional y nacional, se propone los objetivos tanto generales y específicos, la justificación e importancia y la hipótesis.

En el segundo capítulo se desarrolló el marco teórico donde se mencionan conceptos y definiciones de términos referentes a la línea de investigación.

En el tercer capítulo se estableció el método y los materiales, el tipo de investigación es descriptivo- cuantitativo, de carácter aplicativo, de corte transversal pues se estudia el evento actual y en un solo momento. El nivel de la investigación es correlacional analítico, por ende, el método de la investigación es inductivo. En este capítulo también se detallan los procedimientos realizados y se lleva a cabo todo el análisis que facilitan la obtener los resultados.

En el cuarto capítulo se detallan los resultados de acuerdo a cada uno de los objetivos formulados; se identificaron y cuantificaron las parcelas de maíz, se realizó un análisis de suelos en un laboratorio para concentración de nitratos, se elaboró un diagnóstico comparativo preliminar del NDVI y por último y más importante se elaboró un modelo matemático que permitió determinar la concentración de los nitratos en todas las parcelas de maíz del centro poblado Mayhuasi.

En el quinto capítulo se lleva a cabo la discusión de los resultados de forma comparativa con los antecedentes internacionales y nacionales considerados en la presente investigación. En dichos resultados se determinaron similitudes que permitieron realizar un mejor análisis comparativo.

En el sexto capítulo se dan las conclusiones donde se establece que mediante el modelo matemático generado se puede determinar la concentración de nitratos del suelo en todas las parcelas de maíz. En el séptimo capítulo se detallan las recomendaciones, mientras que el octavo y noveno capítulo se mencionan las referencias y anexos considerados en la presente investigación.

1.1. Descripción y formulación del problema

Según el último Censo Nacional Agropecuario realizado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), de los más de 2,2 millones de productores agrícolas que hay en el país, el 56,1% no aplica ningún fertilizante, el 32,7% utiliza fertilizantes minerales en poca cantidad, y solo el 11,2% lo hace de forma suficiente. En Perú, el consumo de los fertilizantes representa un volumen de 1,1 millones de toneladas al año. Sin embargo, es una cifra menor comparada con el mercado de Colombia o México, lo que nos da una idea del potencial de este sector en Perú (INEI, 2012).

En el centro poblado de Mayhuasi no se ha realizado ningún monitoreo de los suelos en el cual se verifique la concentración de los nitratos, siendo el motivo principal el desconocimiento de los pobladores. El nitrógeno es uno de los elementos más importantes en la producción de cultivos; es por ello la necesidad de conocer su concentración siendo este compuesto la principal fuente de nitrógeno que se aporta a las plantas. Existe una preocupación creciente acerca de la pérdida de nutrientes de las plantas hacia el ambiente. Tales pérdidas se originan a través de la lixiviación hacia el agua subterránea y las emisiones a la atmósfera.

Los fertilizantes minerales son una fuente de los nutrientes de las plantas usados en los sistemas de producción vegetal. (FAO, 2004). Un déficit de nitratos en el suelo impacta negativamente en el crecimiento, vigor de las hojas y la producción del maíz.

El proceso de caracterización de las propiedades químicas del suelo, consiste en la toma de muestras en campo y el posterior análisis en laboratorios, lo cual constituye un método tradicional que demanda tiempo y recursos, muchas veces excesivos, aparte de ser destructivo y espacialmente limitado (Guanghui et al., 2016). Es por ello que en el presente estudio se incorpora el uso de las imágenes satelitales las cuales mediante la determinación del índice de vegetación de diferencia normalizada y los resultados obtenidos del monitoreo de suelos en campo permiten mediante la interacción de ambas variables, la elaboración de un modelo matemático, el cual al aplicarse en un formato ráster se puede determinar la concentración de nitratos en las parcelas de maíz en todo el centro poblado Mayhuasi, los resultados se visualizan mediante un mapa y la evaluación de los nitratos se realiza por estratos de profundidad. Este procedimiento podría hacerse de manera periódica y replicarse a zonas más extensas; generando información actualizada para los agricultores, los mismos que podrían incorporar en sus parcelas fertilizaciones nitrogenadas de ser necesario y mejorar su producción de maíz.

El empleo de sensores remotos puede ayudar a mejorar en la eficiencia del uso de N (Yule y Pullanagari, 2009). El mayor desafío para los investigadores del sensoramiento remoto es alcanzar al máximo el potencial de esta herramienta como una fuente de información útil para la toma de decisiones agronómicas (Hatfield et al., 2008).

1.1.1. Problema principal

¿Cuál es la concentración de los nitratos del suelo para cultivos de maíz en el centro poblado de Mayhuasi, distrito de Bambamarca, provincia de Hualgayoc – Cajamarca?

1.1.2. Problemas secundarios

- ¿Cuáles son las parcelas con siembra permanente de cultivos de maíz en el centro poblado de Mayhuasi?
- ¿Cuál es la concentración de nitratos en el suelo para puntos específicos en parcelas representativas?
- ¿Cuál es el diagnóstico comparativo preliminar del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) utilizando imágenes de satélite Sentinel?
- ¿Cuál es el modelo matemático que permitiría determinar la concentración de los nitratos depositados en el suelo y los cultivos de maíz en el centro poblado de Mayhuasi?

1.2. Antecedentes

1.2.1. Antecedentes nacionales

Argote (2018) realizó el estudio: Análisis espacio-temporal del vigor y área foliar de maíz forrajero (*Zea mays* l.) cv. Inia 617-Chuska con tres dosis de nitrógeno mediante imágenes infrarrojas Aerotransportadas.

El objetivo de la investigación fue realizar el análisis espacio-temporal del vigor (NDVI) y área foliar (LAINVDI) de maíz forrajero cv. INÍA 617 Chuska con tres dosis de nitrógeno, mediante imágenes infrarrojas aerotransportadas, para ello se trabajó con un sistema de aeronave pilotada remotamente (RPAS), al que se le acopló un sensor multiespectral para la captación de imágenes infrarrojas de alta resolución (2,2 cm/pixel). Se instaló 3 bloques con 3 tratamientos de dosis de nitrógeno (100, 200 y 300 kg Nitrógeno ha⁻¹); se correlacionó los índices de vegetación NDVI y LAINVDI con las variables agronómicas del cultivo, las variables que mejor se correlacionaron con los índices de vegetación fueron: altura de planta ($r= 0.93$ y $R^2= 0.86$), número de hojas ($r= 0.81$ y $R^2= 0.65$), rendimiento de forraje verde ($r= 0.84$ y $R^2= 0.73$) y rendimiento de mazorca ($r= 0.84$ y $R^2= 0.73$). A partir de los resultados

obtenidos se ha propuesto dos ecuaciones para la estimación de rendimiento de mazorca y de rendimiento de forraje verde, que requieren como dato de entrada el índice NDVI y LAINdVI obtenido en el estado fenológico.

Linarez et al. (2020) realizaron la investigación: *Quality of Agricultural Soils in the Interior Bay of Puno, Peru–2018*. [Calidad de los suelos agrícolas en el interior de la Bahía de Puno, Perú – 2018].

El objetivo fue determinar la calidad de suelos agrícolas de la bahía interior de Puno que comprende desde Chulluni al norte hasta Chimú al sur. Para la determinación de N, P y K se utilizaron los métodos de ensayo colorimétrico, basados en la extracción Mehlich para el caso de nitratos y fósforo y el método de la turbidez para el potasio. Los resultados demostraron que los parámetros físicos y químicos mantuvieron estrecha relación demostrando que los suelos se encuentran en condiciones óptimas, el fósforo presentó 36.8 mg/kg en todos los puntos, el nitrato presentó 0.552% en el punto 1, el potasio presentó 117.76 mg/kg en el punto 3, la materia orgánica presentó 3.80% en el punto 4; los parámetros biológicos corroboraron lo anterior con el número y variedad de especies de los individuos. Los suelos estudiados aún mantienen características apropiadas con una moderada calidad y fertilidad, aunque con valores altos de nitratos que deben ser controlados para garantizar el éxito en futuras siembras, y una evidente contaminación antropogénica que se observa in situ que debe ser controlada.

Sánchez (2018) realizó la investigación: *Diseño de un estimador no lineal para predecir el nivel de nitrógeno en suelo agrícola*.

Los objetivos fueron diseñar un método indirecto, basado en algoritmos propios del área del aprendizaje máquina (ML), que será capaz de estimar valores de los niveles de nitrógeno en el suelo agrícola, tras aprender un modelo a partir de un conjunto de observaciones. Estas observaciones están dadas por parámetros tales como la conductividad eléctrica, temperatura y humedad del suelo. Los valores de dichos parámetros son adquiridos a

través de sensores que existen en el mercado. Para la validación del método se realizaron pruebas experimentales con datos reales que fueron medidos en el fundo Santa Gabriela S.A.C. de Santa Rita de Sigwas, Arequipa, Perú. De los resultados obtenidos del estimador se ha podido notar que las variables más influyentes para obtener los niveles de nitrógeno estimados son la conductividad eléctrica y la temperatura, lo que otorga resultados razonables dentro de un intervalo de confianza del 99 % dados por el rango de los niveles permitidos para el cultivo.

1.2.2. Antecedentes internacionales

Badin et al. (2017) realizaron la investigación: Evaluación del uso de sensores remotos para predecir el potencial de rendimiento y la respuesta a la refertilización nitrogenada de maíz.

Los objetivos fueron evaluar la capacidad del sensoramiento remoto (sensores activos) de estimar la existencia de respuesta a refertilización nitrogenada, evaluar la capacidad del sensoramiento remoto (sensores activos e imágenes Landsat) de estimar el potencial de rendimiento, realizar una evaluación exploratoria de los cambios en la respuesta a la refertilización nitrogenada según ambientes de producción predefinidos y evaluar en forma exploratoria el nivel de coincidencia entre los ambientes de producción predefinidos y el estado del cultivo observado mediante sensoramiento remoto, y su relación con el nivel de respuesta en rendimiento a la refertilización del cultivo. Para esto, se realizó un experimento en cuatro sitios en los departamentos de Colonia y Soriano. El NDVI fue obtenido a través de dos tipos de sensores. A nivel de campo en parcelas experimentales se utilizó RapidSCAN CS-45 HANDHELD CROP SENSOR (sensor activo de mano) y a de chacra se utilizaron las imágenes obtenidas por el satélite Landsat-8 (sensor pasivo, OLI). En cada punto se instalaron dos tratamientos de refertilización; testigo, el cual contó solamente con la fertilización llevada a cabo por cada productor; y el fertilizado, en el cual, además de la fertilización realizada por el productor se aplicó una dosis de 122.6 kg N/ha (considerada como de N no limitante para el

cultivo). Se encontró que el NDVI fue una variable clasificatoria significativa para explicar el rendimiento, pero no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos.

Duggan (2017) realizó la investigación: Análisis de suelos: una herramienta clave para el diagnóstico de fertilidad de suelos y la fertilización de cultivos.

El objetivo fue presentar y discutir los principales beneficios del análisis de suelos y los pasos para realizar un adecuado muestreo de suelos para diagnóstico de fertilidad. Los resultados obtenidos determinaron que el análisis de suelos es una herramienta fundamental para evaluar la fertilidad del suelo, su capacidad productiva y es la base para definir la dosis de nutrientes a aplicar. Para que el dato analítico reportado por el laboratorio sea útil, es imprescindible realizar un adecuado muestreo de suelos, ya que en esta etapa es donde se define la exactitud de los resultados del análisis de suelos.

Manzano y Oña (2018) realizó la investigación: Análisis de la espectroscopia de reflectancia para la determinación de las propiedades químicas de suelos agrícolas en la Parroquia de Lloa.

El objetivo fue analizar las propiedades químicas de suelos agrícolas mediante espectroscopia de reflectancia y los métodos convencionales de laboratorio, con el fin de comparar ambas metodologías y obtener información detallada de los suelos agrícolas de la parroquia de Lloa. Del cálculo de los índices en la imagen se pudo determinar qué valores más altos corresponden a suelo desnudo. No obstante, BSI tiene una menor amplitud en el intervalo lo que potencializa su capacidad de discriminar suelo desnudo a diferencia de CI que al presentar mayor amplitud generaliza coberturas. Llegando a la conclusión que el uso de la espectroscopia de reflectancia permite identificar y cuantificar MO y N de suelos agrícolas de la parroquia de Lloa. Esta técnica reduciría la cantidad de muestras necesarias para caracterizar suelos, sustituyendo parcialmente a los métodos convencionales de laboratorio, ya que no se los puede eliminar por completo porque se requiere de ellos para la elaboración de los modelos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar la concentración de los nitratos del suelo para cultivos de maíz en el centro poblado de Mayhuasi, distrito de Bambamarca, provincia de Hualgayoc – Cajamarca.

1.3.2. Objetivos específicos

- Identificar y cuantificar las parcelas de cultivos de maíz en el centro poblado Mayhuasi.
- Determinar la concentración de nitratos en el suelo para puntos específicos en parcelas representativas.
- Elaborar un diagnóstico comparativo preliminar del NDVI utilizando imágenes de satélite Sentinel.
- Elaborar un modelo matemático que permita determinar la concentración de los nitratos depositados en el suelo y los cultivos de maíz en el centro poblado de Mayhuasi.

1.4. Justificación

1.4.1. Implicaciones prácticas

En los últimos años los pobladores del centro poblado Mayhuasi han notado que las plantaciones de maíz son pequeñas, presentan hojas amarillentas, esto se ve reflejado en la disminución de la producción, generando una preocupación puesto que es el maíz es uno de los productos agrícolas más comercializados y a la vez consumidos en toda la zona.

Resulta de especial interés conocer cuál es el modelo más adecuado que caracterice los nitratos en los cultivos de maíz en todo el centro poblado Mayhuasi y a partir de ahí adoptar medidas que permitan incorporar componentes nitrogenados en cantidades controladas para mejorar las cosechas en las próximas temporadas.

La presente investigación surge con la necesidad de estudiar cual es la concentración de los nitratos en los suelos de maíz, con el propósito de identificar y cuantificar las parcelas de cultivos de maíz, determinar la concentración de nitratos en el suelo para puntos específicos en parcelas representativas, elaborar un diagnóstico comparativo preliminar del NDVI utilizando imágenes de satélite Sentinel, así como elaborar un modelo matemático que permita determinar la concentración de los nitratos depositados en el suelo y los cultivos de maíz en el centro poblado de Mayhuasi.

1.4.2. Relevancia social

La investigación busca proporcionar información a toda la población del centro poblado Mayhuasi para mejorar el conocimiento sobre el alcance de la concentración de nitratos en el suelo y el uso de tecnología satelital para evitar sobrecostos y disminuir el tiempo de análisis.

1.4.3. Valor teórico

Debido a que no se cuenta con suficientes estudios de alcance nacional sobre la determinación de la concentración de nitratos, el presente trabajo es conveniente para afianzar un mayor conocimiento sobre el uso de modelos matemáticos los cuales con información del índice de vegetación de diferencia normalizada de una imagen de satélite Sentinel y los datos puntuales de la concentración de nitratos obtenidos de las muestras de campo, nos permitirá conocer las características y las necesidades de intervención. Según Vázquez et al. (2002) “el NDVI de la imagen de satélite es un buen indicador de la concentración de nitratos del suelo” (p. 9).

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis general

La concentración de los nitratos del suelo para cultivos de maíz en el centro poblado de Mayhuasi se puede determinar mediante el empleo de un modelo matemático en el que utilicen

los resultados de laboratorio del análisis de la concentración de nitratos del suelo en puntos específicos y el NDVI de la imagen satelital Sentinel del 12 de enero del 2019.

1.5.2. Hipótesis específicas

- Mediante el procesamiento de la imagen satelital Sentinel y el trabajo de campo será posible identificar y cuantificar las parcelas con cultivos de maíz en el centro poblado Mayhuasi.
- Mediante la toma de muestras en campo y el análisis de laboratorio será posible determinar la concentración de nitratos en el suelo para puntos específicos en parcelas representativas.
- Mediante el procesamiento de la imagen satelital Sentinel será posible elaborar un diagnóstico comparativo preliminar del NDVI.
- Mediante la elaboración de un modelo matemático será posible determinar la concentración de los nitratos depositados en el suelo y los cultivos de maíz en el centro poblado de Mayhuasi.

II. Marco teórico

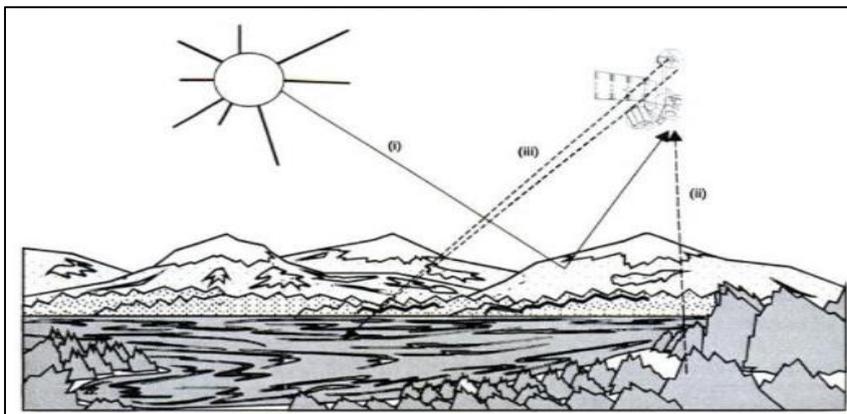
2.1. Bases teóricas sobre el tema de investigación

2.1.1. Teledetección

La teledetección es “la ciencia o el arte de obtener información de un objeto o fenómeno por medio de datos adquiridos sin estar en contacto directo con él”. (Lira, 2003, p. 151). La teledetección es una técnica que nos permite obtener información a distancia de diversos objetos situados sobre la superficie terrestre. Para que este proceso se realice es necesario que el objeto y el sensor tengan algún tipo de interacción. Nuestro sentido de la visión percibe un objeto solo cuando puede interpretar la información que éste le envía. Existen tres principales elementos en el sistema de teledetección: Sensor, objeto observado y flujo energético que los pone en relación y permite, detectar el objeto. “Estas son, precisamente, las tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto: por reflexión, por emisión y por emisión-reflexión”. (Chuvieco, 2008, p. 44)

Figura 1

Flujo de radiación en función a su origen



Nota. Un sensor remoto adquiere información por reflexión, emisión y por emisión-reflexión. De “Teledetección ambiental” (p. 44), por Chuvieco, 2008.

2.1.2. Espectro electromagnético

Se define como cualquier tipo de energía radiante que contiene longitud de onda o frecuencia. Aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, se pueden establecer bandas en donde la radiación electro-magnética presenta un proceder análogo. Las bandas organizadas por su longitud de onda se denomina espectro electro-magnético. “Comprende desde las longitudes de onda más cortas (rayos gamma, rayos x), hasta las kilométricas (telecomunicaciones). Las unidades se medida más comunes se relacionan con la longitud de onda”. (Chuvienco, 2008)

Tabla 1

División del espectro electromagnético

Denominación		Longitud de Onda	
Radiación Ionizante	Indirectamente	Rayos Gamma	< 10 pm
		Rayos X	10 pm – 10 nm
Luz ultravioleta		Ultravioleta extremo	10 - 280 nm
		Ultravioleta medio	280 – 315nm
		Ultravioleta cercano	315- 400 nm
Luz visible		Luz visible	0.4 – 0.7 μm
Luz infrarroja		Infrarrojo cercano	0.7 μm – 1,3 μm
		Infrarrojo medio	1.3 μm – 8 μm
		Infrarrojo lejano	8 μm – 14 μm
Microondas		Microondas	14 μm – 30 cm
Radio		Ultra alta frecuencia de radio (UHF)	30 cm – 1 cm
		Muy alta frecuencia de radio (VHF)	1 cm – 10 m
Radio		Radio de onda corta	10 m – 180 m
		Radio de onda media (AM)	180 m – 650 m
		Radio de onda larga	650 m – 1 km
		Radio de onda muy larga	>10 km

Nota. El espectro electromagnético de acuerdo a su longitud de onda. Adaptado de “Prontuario de la Radiación Electromagnética”, (p.44), por Ordiales, 2007, (EEZA) Artículos.

“Los mecanismos físicos de interacción de la radiación electromagnética con la materia son diferentes en los distintos intervalos espectrales, podemos por tanto pensar que la teledetección nos aportará informaciones suplementarias sobre el estado de los suelos y de la atmósfera”. (Sobrino, 2001, p. 26)

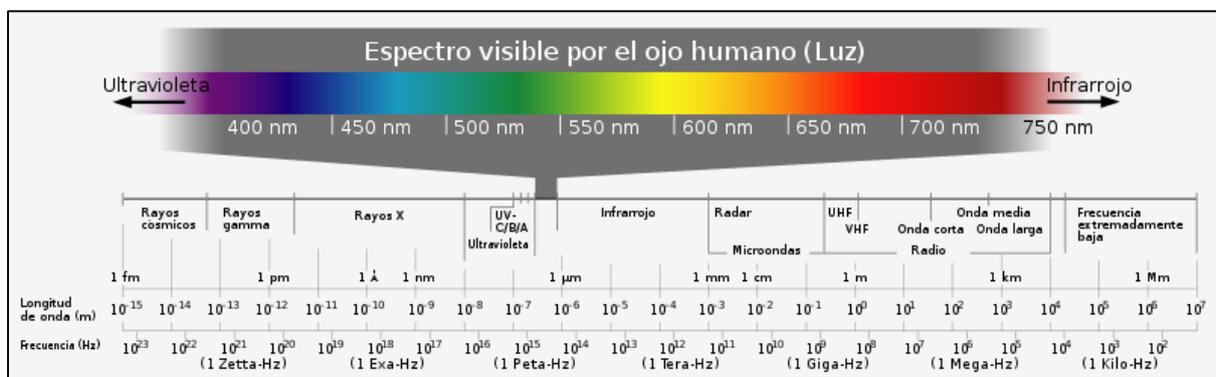
Se describe a continuación algunas divisiones del espectro electromagnético, las más frecuentemente empleadas con la tecnología actual:

- Espectro visible (0.4 a 0.7 μm): Se denomina así por tratarse de la única radiación electro-magnética que pueden percibir nuestros ojos, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Dentro de esta región, suelen distinguirse tres bandas elementales, que se denominan azul (A: 0.4-0.5 μm), verde (V:0.5-0.6 μm), y rojo (R:0.6-0.7 μm) en razón de los colores primarios que nuestros ojos perciben a esas longitudes de onda.
- Infrarrojo cercano (IRC: 0.7 a 1.3 μm): También se denomina infrarrojo próximo, reflejado o fotográfico, puesto que parte de él puede detectarse a partir de películas dotadas de emulsiones especiales. Como veremos luego, resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.
- Infrarrojo medio (IRM: 1.3 a 8 μm): En esta región se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. En el primer caso, hablamos de infrarrojo de onda corta (Short Wave Infrared, SWIR), que se sitúa entre 1.3 y 2.5 μm y resulta una región idónea para estimar el contenido de humedad en la vegetación o los suelos. La segunda banda de interés está comprometida entre 3 y 5 μm , y suele denominarse más propiamente como infrarrojo medio (IRM), siendo determinante para la detección de focos de alta temperatura (incendios o volcanes activos).

- Infrarrojo lejano o térmico (IRT:8 a 14 μm): Incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.
- Micro-ondas (M, por encima de 1 mm): Es un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa (Chuvienco, 2008, p. 46).

Figura 2

El espectro electromagnético



Nota. El espectro electromagnético de acuerdo a su longitud de onda y los colores que representa. De Espectro visible, Wikipedia, 2020 (https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagn%C3%A9tico).

2.1.3. Firmas espectrales

La brillantez del objeto es captada por el sensor y esto depende del rango de reflectancia determinado.

“El comportamiento de la reflectancia de un objeto constituye un modelo de respuesta espectral, es decir, las propiedades particulares de cada material generan una distribución propia de la reflectancia de la energía, generando un patrón único tan exclusivo como la huella digital o firma espectral”. (Melesio, 1991, p. 22)

2.1.3.1. Firma espectral del suelo. El suelo es un sistema complejo y difícil de analizar pues posee materiales orgánicos e inorgánicos que tienen propiedades físicas y químicas que pueden afectar a la absorción y reflectancia del mismo (Machuca, 2015).

Manzano (2004) menciona que, “los principales factores que afectan el comportamiento espectral de los suelos son el color y el contenido de humedad”. “Otros factores que pueden intervenir son: el contenido de materia orgánica, la textura y estructura, disposición vertical y horizontal, así como los ángulos de iluminación y observación de éstos”. (Hernández y Montaner, 2009)

Otro punto a tener en cuenta es el contenido de sal pues es un factor que modifica la reflectancia de los suelos, esto debido a que las sales cuando se encuentran en la superficie se muestran de manera más brillante en las imágenes y con una alta reflectividad. (Girón, 2009)

Según Qiao y Zhang (2012) “las propiedades químicas que presentan una alta correlación con la respuesta espectral del suelo son el pH y nitrógeno”. Cabe resaltar que para el análisis de la composición química del suelo se debe recurrir al uso de espectros en las regiones VIS, NIR, MIR ya que existen propiedades que se presentan de manera más clara y precisa en bandas específicas. (Camacho, 2013)

2.1.3.2. Firma espectral de la vegetación. “La caracterización espectral de las masas vegetales constituye una de las tareas más interesantes en la teledetección”. (Chuvienco, 2008, p. 60). Pese a su gran importancia, aun ofrece notables dificultades como consecuencia de los múltiples factores que influyen en la radiación que finalmente detecta el sensor. Podemos dividir estos factores en tres grandes grupos. (Belward et al., 1989)

- Los relacionados con la reflectividad de la hoja, que suele ser el elemento más vivible desde una plataforma espacial. Aquí los factores más destacados son la presencia de pigmentos, la estructura celular y el contenido de humedad.
- Las características geométricas de la planta, principalmente su área foliar, la forma de

las hojas, su distribución en la planta, la geometría del dosel, la importancia del componente leñoso, etc.

Finalmente, habría que considerar aquellos aspectos derivados de la situación geográfica de la planta: pendiente, orientación, asociación con otras especies, reflectividad del sustrato, geometría de plantación, condiciones atmosféricas, etc.

En lo que respecta a la reflectividad de la hoja el nivel de reflectancia se ve modificado principalmente por factores como: los tipos de pigmentos, estructura de las hojas y el contenido de humedad. El primero afecta a las longitudes de ondas del espectro visible (0.4-0.7 μ m) donde el 65% es absorbido por la clorofila, el 29% por la xantófila y el 6% por carotenos. La estructura de las hojas (capa esponjosa del mesófilo) a su vez aumenta la reflectividad en la zona del infrarrojo cercano (0.8-1.1 μ m).

Finalmente, entre los rangos 1.4 μ m-1.8 m (infrarrojo medio) la reflectividad depende del contenido de agua entre y dentro de las células, en condiciones de hidratación normales ambos valles son profundos y marcados, en condiciones de estrés hídrico estos son menos marcados aumentando su reflectividad (Alonso y Moreno, 1999).

2.1.4. Imágenes satelitales

“Una imagen satelital es una malla bidimensional formada por celdas cuadradas o rectangulares llamados pixeles, a los cuales se les asigna un valor digital o que hace referencia a la radiación capturada”. (Sarría y Palazón, 2008).

La Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial (CONIDA) menciona que las imágenes satelitales pueden ser usadas para monitorear el estado de los ríos y predecir potenciales inundaciones, actualización del catastro agrícola, búsqueda de zonas potenciales de existencia de acuíferos, para brindar los esfuerzos de respuesta y auxilio a los damnificados de catástrofes naturales, mapear y evaluar el daño causado por los fenómenos atmosféricos, se utiliza para el cálculo del impacto en la salud pública debido a los volúmenes

de agua y el de materiales sujetos a descomposición. La información espacial puede ser utilizada en todas las actividades socioeconómicas que desarrolla el sector público y privado del país. (CONIDA, 2011)

2.1.5. Misión Sentinel

La Agencia Espacial Europea (ESA) está desarrollando una nueva familia de misiones para atender a las necesidades operacionales del programa Copérnico. Cada misión Sentinel está formada por una constelación de dos satélites, lo que permite cumplir los requisitos de cobertura y frecuencia de observación y ofrecer un conjunto robusto de datos para los servicios del programa Copérnico. Estas misiones transportan las tecnologías más avanzadas para la observación de la tierra, como los instrumentos radar o multiespectrales que permiten monitorizar cualquier cambio en el terreno, en los océanos o en la atmósfera. (ESA, 2019)

2.1.5.1. Sentinel-2. La misión Copernicus Sentinel-2 comprende una constelación de dos satélites de órbita polar colocados en la misma órbita sincrónica del sol, en fase a 180° entre sí. Su objetivo es monitorear la variabilidad en las condiciones de la superficie terrestre, y su ancho de franja ancha (290 Km) y su alto tiempo de revisión (10 días en el ecuador con un satélite y 5 días con 2 satélites en condiciones sin nubes, lo que resulta en 2-3 días en latitudes medias) apoyarán el monitoreo de los cambios en la superficie de la Tierra. Los límites de cobertura son de entre latitudes 56° sur y 84° norte. (ESA, 2015)

Sentinel-2 cuenta con una cámara multiespectral de alta resolución, tiene 13 bandas espectrales que permiten visualizar la superficie terrestre y la vegetación. Su campo de visión abarca 290 Km de anchura y sobrevuelos frecuentes combinado con su capacidad espectral proporcionará las mejores vistas de la tierra. La misión utiliza dos satélites idénticos que giran en la misma órbita y están separados 180°, cada 5 días es posible tener una cobertura y descarga de datos óptimos. La misión proporcionará sobre todo información útil para las prácticas agrícolas y forestales, y para gestionar la seguridad alimentaria. Las imágenes de los satélites serán

empleadas para determinar varios índices vegetales, como el área con clorofila en la hoja y el contenido en agua. Esto es importante en estudios de producción de cosechas, para vigilar el crecimiento de las plantas, con Sentinel-2 se puede mapear el estado y los cambios de la superficie terrestre, y observar las selvas. También alertará de la contaminación en lagos y aguas costeras. Las imágenes de inundaciones, erupciones volcánicas y deslizamientos contribuirán a gestionar las consecuencias de estos desastres, y ayudarán en las tareas de ayuda humanitaria. (ESA,2017)

Sentinel-2A es el resultado de una colaboración estrecha entre la ESA, la Comisión Europea, la industria, los proveedores de servicios y los usuarios de datos. Ha sido diseñado y construido por un consorcio de 60 compañías liderado por Airbus Defence and Space, con el apoyo de la agencia espacial francesa (CNES) para optimizar la calidad de las imágenes, y del Centro Aeroespacial Alemán DLR para mejorar la recuperación de datos mediante comunicaciones ópticas. Con su cámara multiespectral y su amplia cobertura, la misión Sentinel-2 ofrece no solo continuidad, sino que amplía las capacidades de las misiones Spot, francesa, y Landsat, estadounidense. (ESA, 2017).

La misión Sentinel-2 está compuesta por el instrumento Multi Spectral Instrument (MSI), que captura la información de la superficie terrestre en 13 bandas espectrales, con diferentes resoluciones espaciales, cuatro bandas de 10 m, seis bandas de 20 m y tres bandas con resolución de 60 m. El lanzamiento del Sentinel-2A se realizó el 23 de junio del 2015 y el del Sentinel-2B el 7 de marzo del 2017. El tiempo de revisita, estando ambos satélites operativos, es de 5 días. (Master GIS, 2019).

2.1.5.1.1. Resolución del Sensor Sentinel. Se detalla cuatro tipos de resoluciones de un sensor:

- Espacial: Es la capacidad de un sensor para distinguir objetos de cierto tamaño.
- Espectral: se refiere al número de bandas espectrales que puede discriminar el sensor

y el ancho que éstas poseen.

- Radiométrica: se refiere a la sensibilidad que tiene el sensor de detectar variaciones de la radiancia que recibe. En fotografías, el número de grises y en sensores óptico-electrónicos, la cantidad de valores digitales.
- Temporal: se refiere a la frecuencia de cobertura de una misma porción de la superficie terrestre. Puede ser variable. (los meteorológicos, cada 30 minutos, los dedicados a recursos naturales, 3 semanas). (Basterra, 2011)

Tabla 2

Resolución espacial del satélite Sentinel-2

	Bandas Sentinel -2	Longitud central	Resolución
Banda 1	Coastal aerosol	0.443	60
Banda 2	Blue	0.490	10
Banda 3	Green	0.560	10
Banda 4	Red	0.665	10
Banda 5	Vegetation red edge	0.705	20
Banda 6	Vegetation red edge	0.740	20
Banda 7	Vegetation red edge	0.783	20
Banda 8	NIR	0.842	10
Banda 8A	Vegetation red edge	0.865	20
Banda 9	Water vapour	0.945	10
Banda 10	SWIR – Cirrus	1.375	60
Banda 11	SWIR	1.610	20
Banda 12	SWIR	2.190	20

Nota. Resolución espacial del Satélite Sentinel-2 para cada Banda. De “Sentinel 2 multiespectral”, por ESA, 2019, Características de los satélites Sentinel (<https://www.mastergis.com/caracteristicas-sentinel/>).

2.1.6. Índices de vegetación

El índice de vegetación (IV) es un parámetro calculado a partir de los valores de reflectividad a distintas longitudes de onda y que pretende extraer la información relacionada con la vegetación minimizando la influencia de otros factores externos como las propiedades ópticas del suelo, la irradiancia solar etc. El índice de vegetación ideal es “aquel particularmente sensible a la cubierta vegetal, insensible al brillo y color del suelo y poco afectado por las

perturbaciones atmosféricas, los factores medioambientales y la geometría de iluminación y de observación”. (Jackson et al., 1983). Evidentemente, el índice de vegetación ideal no existe y los que se encuentran en la bibliografía son diversas aproximaciones al mismo. Como más del 90% de la información espectral de una cubierta vegetal está contenida en las bandas roja e infrarroja próxima, son estas dos bandas las que utilizan principalmente. (Sobrino, 2001)

2.1.6.1. Índice de la razón de Vegetación (RVI). Poco sensible a las condiciones de iluminación, pero mucho a las propiedades ópticas de la tierra. (Gutiérrez y Nieto, 2006)

2.1.6.2. Índice de vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Es el más utilizado, la normalización que realiza reduce el efecto de degradación de calibración del sensor y la influencia de los efectos atmosféricos. Presenta una gran sencillez matemática. (Gutiérrez y Nieto, 2006)

$$NDVI = \frac{IR_p - R}{IR_p + R} \quad (Rouse \text{ et al.}, 1974)$$

NDVI: Índice de vegetación de Diferencia Normalizada

IR_p : Infrarrojo positivo

R: Rojo

El NDVI es sin lugar a dudas, el índice más utilizado en aplicaciones agronómicas de teledetección ya que reúne tres características muy importantes: su sencillez matemática, su fácil interpretación y su poder de normalización de la respuesta espectral de sistemas de vegetación, alcanzando un alto grado de correlación con diversos parámetros de interés agronómico. El NDVI es un índice de vegetación bidimensional. (Rouse et al., 1974). Este índice toma valores en el rango de -1.0 a +1.0, donde valores negativos indican superficies sin vegetación, tal como agua, nieve o nubes y valores positivos crecientes indican vegetación creciente, el suelo posee valores bajos, mientras la vegetación se encuentra dentro del rango 0.2 a 0.8. El éxito del NDVI como un descriptor de las variaciones de vegetación, a pesar de

los efectos atmosféricos y degradación radiométrica del sensor en las bandas del infrarrojo cercano y visible, reside en la normalización que realiza reduciendo el efecto de la degradación de calibración del sensor en aproximadamente un 6% del valor total del índice. (Bannari et al., 1995)

2.1.6.3. Índice de vegetación Ajustado al Suelo (SAVI). Indicado para el trabajo en zonas semiáridas, donde la contribución del suelo es muy importante, minimizando el efecto de la reflectividad del suelo mediante la introducción del factor L, constante para ajustar la línea vegetación – suelo al origen. (Huete, 1988)

2.1.7. El suelo

Es el medio natural para el crecimiento de las plantas. También se ha definido como un cuerpo natural que consiste en capas de suelo (horizontes del suelo) compuestas de materiales de minerales meteorizados, materia orgánica, aire y agua. El suelo es el producto final de la influencia del tiempo y combinado con el clima, topografía, organismos (flora, fauna y ser humano), de materiales parentales (rocas y minerales originarios). Como resultado el suelo difiere de su material parental en su textura, estructura, consistencia, color y propiedades químicas, biológicas y físicas. (FAO, 2020)

El suelo es un componente esencial de la tierra y ecosistemas. Ambos son conceptos más amplios que abarcan la vegetación, el agua y el clima en el caso de la tierra, y además abarca también las consideraciones sociales y económicas en el caso de los ecosistemas. (FAO, 2020)

2.1.7.1. Propiedades físicas del suelo. Las propiedades físicas de los suelos, determinan en gran medida, la capacidad de muchos de los usos a los que el hombre los sujeta. La condición física de un suelo, determina, la rigidez y la fuerza de sostenimiento, la facilidad para la penetración de las raíces, la aireación, la capacidad de drenaje y de almacenamiento de agua, la plasticidad, y la retención de nutrientes. Se considera necesario para las personas involucradas en el uso de la tierra, conocer las propiedades físicas del suelo, para entender en qué medida y cómo influyen en el crecimiento de las plantas, en qué medida y cómo la actividad humana puede llegar a modificarlas, y comprender la importancia de mantener las mejores condiciones físicas del suelo posibles. (Rucks et al., 2004)

2.1.7.2. Propiedades químicas del suelo. Las propiedades químicas resultan del proceso de formación y evolución del suelo y su conocimiento permite interpretar como sus reacciones afectan a la capacidad de almacenar y liberar nutrientes. Estas propiedades son importantes para la fertilidad y el crecimiento de la planta. (Fassbender, 1975)

Ph: Según Osorio (2012), el pH es una propiedad química que mide el grado de acidez o alcalinidad de las soluciones acuosas. Por definición se considera que el pH es el logaritmo negativo de la actividad de los protones (H^+) en una solución acuosa.

En los suelos el pH es una propiedad química de mucha importancia porque indica que tan ácida o alcalina es la solución del suelo, que es de donde las raíces y los microorganismos del suelo toman sus nutrientes.

El pH (potencial de hidrógeno) determina el grado de adsorción de iones (H^+) por las partículas del suelo e indica si un suelo está ácido o alcalino. Es el indicador principal en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, influyendo en la solubilidad, movilidad, disponibilidad y de otros constituyentes y contaminantes inorgánicos presentes en el suelo. El valor del pH en el suelo oscila entre 3.5 (muy ácido) a 9.5 (muy alcalino). Los suelos muy ácidos (<5.5) tienden presentar cantidades elevadas y tóxicas de aluminio y manganeso. Los suelos muy alcalinos

(>8.5) tienden a dispersarse. La actividad de los organismos del suelo es inhibida en suelos muy ácidos y para los cultivos agrícolas el valor del pH ideal se encuentra en 6.5. (FAO, 2020)

Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC): La capacidad de intercambio catiónico son los procesos reversibles donde las partículas sólidas del suelo absorben cationes de la fase acuosa, liberando al mismo tiempo otros iones en cantidades equivalentes, y estableciendo el equilibrio químico entre ambas fases. La CIC refleja la suma total de los cationes intercambiables de un suelo, cuanto mayor es la CIC mayor es la cantidad de cationes que este puede retener (absorber). La CIC depende sobre todo de la cantidad y el tipo de arcillas y del contenido de materia orgánica presentes en el suelo (IGAC, 2006; Rhoades, 1982).

En este sentido, la CIC es un indicador directo de la fertilidad del suelo, debido a que controla la disponibilidad de nutrientes para las plantas: K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , y caracteriza la degradación química del suelo y los procesos de floculación y dispersión de arcilla y, por consiguiente, en el desarrollo de la estructura y estabilidad de los agregados (Arévalo y Gauggel, 2014).

El nivel de CIC indica la habilidad de suelos a retener cationes, disponibilidad y cantidad de nutrientes a la planta, su pH potencial entre otras. Un suelo con bajo CIC indica baja habilidad de retener nutrientes, arenoso o pobre en materia orgánica. La unidad de medición de CIC es en centimoles de carga por kg de suelo $cmol_c/kg$ o $meq/100g$ de suelo. (FAO, 2020)

Conductividad Eléctrica (CE): La CE mide la capacidad del suelo para conducir corriente eléctrica al aprovechar la propiedad de las sales en la conducción de esta; por lo tanto, la CE mide la concentración de sales solubles presentes en la solución del suelo. Su valor es más alto cuanto más fácil se mueva dicha corriente a través del mismo suelo por una concentración más elevada de sales. Las unidades utilizadas para medir la CE son dS/m (decisiemens por metro). Esta medida es equivalente a la que anteriormente se utilizaba: $mmhos/cm$. (INTAGRI S.C, 2020)

Materia orgánica (MO): La materia de la materia orgánica está formada por microorganismos, que a su vez crecen a partir de restos, o de enmiendas orgánicas. Durante el proceso degradativo, la relación C/N disminuye, de modo que el contenido medio final en el humus está en torno al 5% de nitrógeno. (López, 2005)

Nutrientes: La cantidad de nutrientes presente en el suelo determina su potencial para alimentar organismos vivos. Los 16 nutrientes esenciales para el desarrollo y crecimiento de las plantas se suelen clasificar entre macro y micro nutrientes dependiendo de su requerimiento para el desarrollo de las plantas. Los macronutrientes se requieren en grandes cantidades e incluyen Carbono(C), Hidrógeno (H), Nitrógeno(N), Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Azufre(S). Los micronutrientes por otro lado se requieren en pequeñas, su insuficiencia puede dar lugar a carencia y su exceso a toxicidad, se refieren a Hierro (Fe), Zinc (Zn), Manganeseo (Mn), Boro (B), Cobre (Cu), Molibdeno (Mo), Cloro (Cl). (FAO, 2020)

Nitrógeno: El nitrógeno del suelo es uno de los elementos de mayor importancia para la nutrición de las plantas y más ampliamente distribuido en la naturaleza. Se asimila por las plantas en forma catiónica de amonio NH_4^+ o aniónica de nitrato NO_3^- . A pesar de su amplia distribución en la naturaleza se encuentra en forma inorgánica por lo que no se pueden asimilar directamente. Además, existen las formas gaseosas del N pero son muy pequeñas y difíciles de detectar como N_2O , NO , NO_2 , NH_3 y N_2 presente en la atmósfera del suelo. (FAO, 2020)

Nitratos y nitritos son compuestos iónicos que se encuentran en la naturaleza, formando parte del ciclo del nitrógeno. El NO_3^- es la forma estable de las estructuras oxidadas del nitrógeno, y a pesar de su baja reactividad química puede ser reducido por acción microbológica. El NO_2^- , es oxidado con facilidad por procesos químicos o biológicos a nitrato, o bien reducido originando diversos compuestos. En los suelos, los fertilizantes y vertidos residuales conteniendo nitrógeno orgánico son descompuestos para dar en un primer paso NH_4^+ , que a continuación es oxidado a nitrito y a nitrato. Parte de este nitrato es absorbido por las plantas,

que lo emplean en la síntesis de proteínas vegetales, pudiendo el resto pasar a las aguas subterráneas. (Antón y Lizaso, 2001)

2.1.7.3. Requerimientos de fertilizantes por el maíz

En el cultivo del maíz existen, etapas donde se extrae algunos nutrientes en mayor cantidad que otros, de esta manera se observa que la mayor demanda de nutrientes se da entre los 30 y 60 días después de la siembra, siendo el más adecuado para la fertilización de los elementos móviles como el N en los primeros 30 días, al final de los 90 días se ha completado cerca de 88% de sus necesidades de N, 74% de P, 100% de K y el 90% de Mg respectivamente. (Injante y Joyo, 2010)

Tabla 3

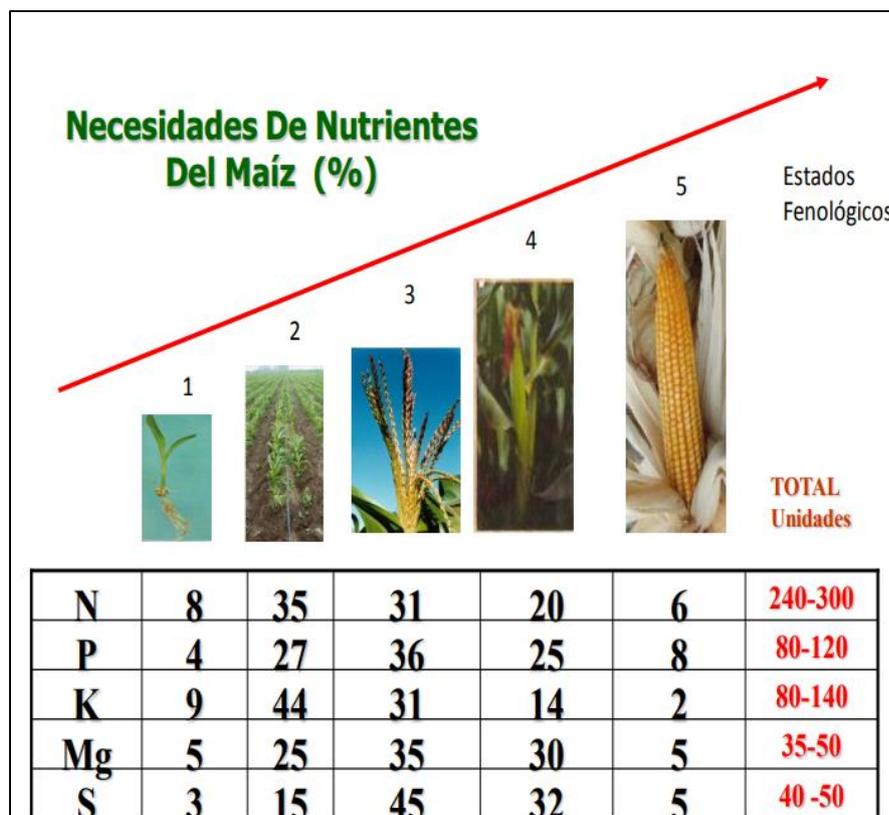
Absorción de nutrientes (%) durante el ciclo vegetativo de maíz

Periodo				
Nutrientes	0 -30 días	30 - 60 días	60 -90 días	90 – 120 días
N	2,5	38,5	47,0	12,0
P	1,0	26,5	46,5	26,0
K	4,4	66,0	29,6	- 13,5
Ca	4,6	49,2	46,2	0
Mg	1,5	46,5	42,0	10,0

Nota. Pérdida de K por lavado en la parte aérea. De Guía técnica curso taller manejo integrado de maíz amarillo, por Injante y Joyo, 2010. https://www.agrobanco.com.pe/pdfs/capacitacionesproductores/MAD/MANEJO_INTEGRADO_DE_MAIZ_AMARILLO_DURO.pdf

Figura 3

Necesidades de nutrientes del maíz (%)



Nota. Necesidades de nutrientes por estados fenomenológicos del maíz. De Guía técnica curso – taller manejo integrado de maíz amarillo, por Injante y Joyo, 2010. https://www.agrobanco.com.pe/pdfs/capacitacionesproductores/MAD/MANEJO_INTEGRADO_DE_MAIZ_AMARILLO_DURO.pdf

2.1.8. Sistema de información geográfica

Al GIS se le conoce como un conjunto de herramientas, que por medio de estas se puede integrar información, traducidas en variables y/o elementos localizados en el espacio, modificando diversos atributos. (Olaya, 2014).

Básicamente, un GIS ha de permitir la realización las siguientes operaciones:

- Gestionar datos espaciales (edición, almacenamiento y visualización).
- Analizar datos espaciales y elaboración de modelos de naturaleza muy compleja o simples sobre componentes espaciales y temáticos.

- Generar información temática (mapas), escrita (informes) y gráfica

2.1.9. Geoestadística

La geoestadística es una rama de la estadística aplicada que se especializa en el análisis y la modelación de la variabilidad espacial en ciencias de la tierra. Su objeto de estudio es el análisis y la predicción de fenómenos en espacio y/o tiempo, tales como: ley de metales, porosidades, concentraciones de un contaminante, etc. Aunque el prefijo geo- es usualmente asociado con geología, sin embargo, la geo estadística tiene sus orígenes en la minería. Actualmente, la geoestadística es un conjunto de técnicas usadas para analizar y predecir valores de una propiedad distribuida en espacio o tiempo. En contraposición con la estadística clásica o convencional, tales valores no se consideran independientes, por el contrario, se suponen de manera implícita que están correlacionados unos con otros, es decir que existe una dependencia espacial. Intuitivamente esto indica que mientras más cercanos estén situados dos puntos están más correlacionados y mientras más separados hay menos relación entre estos. (Viera y González, 2002)

2.1.10. Diseño descriptivo

“La investigación descriptiva consiste en la recopilación de datos que describen los acontecimientos y luego organiza, tabula, representa y describe la recopilación de datos”. (Glass y Hopkins, 1984). A menudo utiliza ayudas visuales tales como gráficos y tablas para ayudar en la comprensión de la distribución de los datos. Debido a que la mente humana no puede extraer el significado completo de una gran masa de datos en bruto, las estadísticas descriptivas son muy importantes en la síntesis de los datos de una forma más manejable. Cuando en profundidad, las descripciones narrativas de un pequeño número de casos están involucradas, la investigación utiliza a la descripción como una herramienta para organizar los datos en patrones que surgen durante el análisis. (Abreu, 2012)

2.1.10.1. Diseño descriptivo transversal. Intentan analizar el fenómeno en un periodo de tiempo corto, un punto en el tiempo, por eso también se les denomina “de corte”. Es como si diéramos un corte al tiempo y dijésemos que ocurre aquí y ahora mismo. Un estudio que pretendiera conocer la prevalencia de las caries dentales en los escolares de educación primaria de los colegios de la Comunidad Autónoma de Madrid, sería un estudio de este tipo. (Salinero, 2004)

2.1.11. Distribución normal

Es la distribución de probabilidades más importante para las variables aleatorias continuas. Fue Karl Gauss, matemático y astrónomo del siglo XVIII, quien contribuyó para la formulación de los fundamentos teóricos que la sustentan. (Valerio y Arturo, 1987)

Características de la distribución normal

- La distribución normal de probabilidades es unimodal.
- La curva normal es simétrica. Por estas características de la distribución de probabilidad normal, la media, la mediana y la moda tienen el mismo valor que está ubicado en el centro de la distribución.
- Ambos lados (colas) de la distribución normal de probabilidades, son asintóticas al eje horizontal.
- Para la distribución normal, la probabilidad de que se dé un valor específico de la variable es cero. Igual sucede con cualquier otra distribución de probabilidades para variables continuas.
- Cada curva normal está determinada por su medida (μ) y su desviación estándar (σ). Por lo tanto, la curva normal es única, sino que existe un ilimitado número de curvas normales, según sea diferente su medida y/o su desviación estándar. (Valerio y Arturo, 1987)

2.1.11.1. Pruebas de la distribución normal

- **Prueba Shapiro-Wilk**

Según Novales (2010), este test se emplea para contrastar normalidad cuando el tamaño de la muestra es menor a 50 observaciones y en muestras grandes es equivalente al test de Kolmogórov-Smirnov. El método consiste en comenzar ordenando la muestra de menor a mayor valor, obteniendo el nuevo vector muestral. Cuando la muestra es como máximo de tamaño 50, se puede contrastar la normalidad con la prueba de Shapiro-Wilk, procediéndose a calcular la media y la varianza muestral. Se rechaza la hipótesis nula de normalidad si el estadístico Shapiro-Wilk $-W-$ es menor que el valor crítico proporcionado por la tabla elaborada por los autores para el tamaño de la muestra y el nivel de significancia dado.

Shapiro-Wilk, como prueba de normalidad, fue introducido considerando que el gráfico de probabilidad normal que examina el ajuste de un conjunto de datos de muestra para la distribución normal es semejante a la de regresión lineal - la línea diagonal del gráfico es la recta de ajuste perfecto-, con la diferencia de que esta línea es similar a los residuos de la regresión. Mediante el análisis de la magnitud de esta variación -análisis de varianza-, la calidad del ajuste puede ser examinado. La prueba puede aplicarse a muestras grandes, como fue sugerido por Royston, que también produjo algoritmos para implementar su extensión y que se implementa en algunos softwares especializados estadísticos (Carmona y Carrión, 2015)

- **Prueba Kolmogórov-Smirnov**

La prueba de Kolmogórov-Smirnov es una prueba de bondad de ajuste ampliamente utilizada para probar la normalidad de los datos muestrales, siendo particularmente útil en procesos físicos no lineales e interactivos, por cuanto éstos conducen, generalmente, a distribuciones no gaussianas y, por lo tanto, el mecanismo generador de los procesos puede entenderse mejor al examinar la distribución de las variables seleccionadas. Además, para implementar pruebas de normalidad algunas pruebas estadísticas requieren o son óptimos bajo el supuesto de

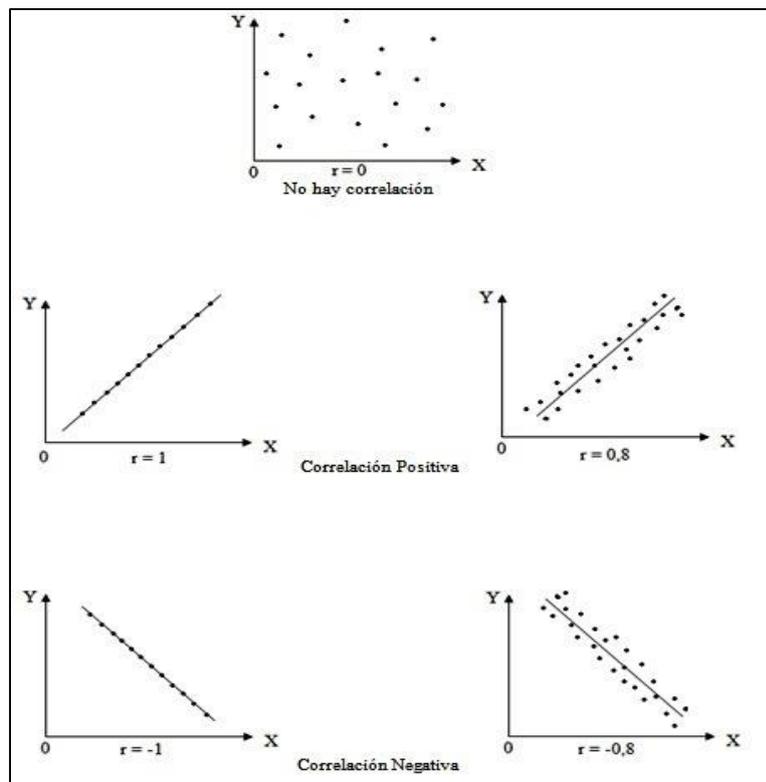
normalidad y, por lo tanto, constituye un prerequisite determinar si este supuesto se cumple (Steinskog et al., 2007). La prueba Kolmogórov-Smirnov se aplica para contrastar la hipótesis de normalidad de la población.

2.1.12. Coeficiente de correlación R de Pearson.

Dado dos variables, la correlación permite hacer estimaciones del valor de una de ellas conociendo el valor de la otra variable. Los coeficientes de correlación son medidas que indican la situación relativa de los mismos sucesos respecto a las dos variables, es decir, son la expresión numérica que nos indica el grado de relación existente entre las 2 variables y en qué medida se relacionan. Son números que varían entre los límites +1 y -1. Su magnitud indica el grado de asociación entre las variables; el valor $r = 0$ indica que no existe relación entre las variables; los valores ± 1 son indicadores de una correlación perfecta positiva (al crecer o decrecer X, crece o decrece Y) o negativa (Al crecer o decrecer X, decrece o crece Y). (Suárez, 2011)

Figura 4

Coeficiente de correlación de Karl Pearson



Nota. Modelo de gráficas para el coeficiente de correlación de Karl Pearson de acuerdo al valor que tome el “r” entre -1 y 1. De “Coeficiente de Correlación de Karl Pearson” (p.1), por Suárez Ibujés, 2011.

Para interpretar el coeficiente de correlación utilizamos la siguiente escala:

Tabla 4

Valores del coeficiente de correlación

Valor	Significado
-1	Correlación negativa grande y perfecta
-0.9 a -0.99	Correlación negativa muy alta
-0.7 a -0.89	Correlación negativa alta
-0.4 a -0.69	Correlación negativa moderada
-0.2 a -0.39	Correlación negativa baja
-0.01 a -0.19	Correlación negativa muy baja
0	Correlación nula
0.01 a 0.19	Correlación positiva muy baja
0.2 a 0.39	Correlación positiva baja
0.4 a 0.69	Correlación positiva moderada

0.7 a 0.89	Correlación positiva alta
0.9 a 0.99	Correlación positiva muy alta
1	Correlación positiva grande y perfecta

Nota. Valores de correlación de -1 a 1 con detalle en su significancia de “coeficiente de correlación de Karl Pearson” (p.2), por Suárez Ibujés, 2011.

2.1.12.1. Relación o tendencia significativa en los datos.

Según Ferrero (2020), A menudo nos interesa probar si existe una relación o tendencia significativa en los datos, esto es, si la correlación es significativamente distinta de cero.

Utilizaremos las siguientes hipótesis:

- $H_0: = 0$ (no existe relación)
- $H_1: \neq 0$ (sí existe relación)

Si utilizamos un nivel de confianza del 95% y obtenemos que $p < .05$, rechazamos la H_0 y decimos que existe una correlación significativa (H_1). En caso contrario, no podemos rechazar la hipótesis nula, y no podemos afirmar que la correlación difiera significativamente de 0.

Regla de decisión: En la prueba de hipótesis para la correlación, si $p < 5\%$ (para un nivel de confianza del 95%), nos indica que la correlación entre las dos variables numéricas es significativa y que podremos interpretar su signo y magnitud.

Esta prueba se puede aplicar cuando se cumplen ciertos supuestos:

- La relación entre las dos variables numéricas debe ser lineal (en el caso de la correlación de Pearson) o monótona (en el caso de la correlación de Spearman).
- No existen valores atípicos (outliers, en el caso de Pearson; recuerda que la versión de Spearman es algo más robusta porque trabaja con rangos en lugar de los valores originales).
- Tenemos suficientes datos para realizar la prueba (principalmente en el caso de Pearson).

- Los datos siguen una distribución normal (en el caso de la correlación de Pearson). Para asegurarnos que cumpla esta condición, utilizaremos la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk cuya hipótesis nula es que los datos se distribuyen normalmente. También se puede utilizar el gráfico de normalidad Q-Q.

2.1.13. Análisis de regresión

El análisis de regresión involucra el estudio la relación entre dos variables cuantitativas.

En general interesa:

- Investigar si existe una asociación entre las dos variables testeando la hipótesis de independencia estadística.
- Estudiar la fuerza de la asociación, a través de una medida de asociación denominada coeficiente de correlación.
- Estudiar la forma de la relación. Usando los datos propondremos un modelo para la relación y a partir de ella será posible predecir el valor de una variable a partir de la otra. (Orellana, 2015)

III. Método

3.1. Tipo de investigación

En el presente estudio la información se recopila mediante el procesamiento de imágenes satelitales y la toma de muestras del suelo; por lo tanto, el tipo de investigación es descriptivo- cuantitativo, de carácter aplicativo, de corte transversal pues se estudia el evento actual y en un solo momento.

El nivel de la investigación es correlacional analítico, por ende, el método de la investigación es inductivo y establece la metodología a utilizar.

3.2. Variables

A continuación, se presentan las variables de la presente investigación:

Tabla 5*Variable Independiente*

Variable Independiente	Dimensión	Indicadores	Instrumentos
Cultivos de maíz	Parcela	Mapa base del área de estudio Identificación de parcelas	Software ArcGIS 2016 Trabajo de campo

Tabla 6*Variable Dependiente*

Variable Dependiente	Dimensión	Indicadores	Instrumentos
Concentración de nitratos del suelo	Muestras de suelo	Calicata	Análisis químico en laboratorio
	NDVI	Resolución espectral del sensor	Imagen satelital Sentinel
	Análisis geoestadístico	Tablas y gráficos estadísticos	Software IBM SPSS Statistics 23
	Modelo matemático	Ecuaciones matemáticas y gráficos	Software Excel 2016 Software ArcGIS 2016

3.3. Población y muestra

3.4. Ámbito temporal y espacial

3.4.1. Temporal

El estudio se realizó en base a la campaña de siembra de maíz de noviembre 2018; tomándose la muestra de suelo el 2 de enero del 2019 cuando el cultivo tenía 2 meses y se encontraba en una etapa temprana de crecimiento. Las imágenes de Satélite Sentinel a utilizar también tienen fecha del 12 de enero del 2019, lo que nos permite realizar las comparaciones en una sola época del año.

3.4.2. Espacial

El área de estudio comprende todo el centro poblado Mayhuasi, localizado en el distrito de Bambamarca, provincia de Hualgayoc, en el departamento de Cajamarca.

3.4.3. Población

El centro poblado Mayhuasi como área de estudio comprende 127 ha, siendo la población en estudio todos los cultivos agrícolas de la zona entre los cuales tenemos: Maíz, frejol, zapallo, habas, papa, alfalfa, entre otros; siendo el más representativo el cultivo de maíz.

3.4.4. Muestra

La muestra comprende todos los cultivos agrícolas de maíz que ocupan 24.87 ha del total de área del centro poblado Mayhuasi.

3.5. Instrumentos

Para el presente trabajo de investigación, se clasificaron los instrumentos de la siguiente manera:

3.5.1. Información temática y satelital

- Imagen satelital Sentinel 2B, con un procesamiento de nivel L2A (imágenes corregidas atmosféricamente) y fecha de toma de la imagen del 12 de enero de 2019.

- Visor de Imágenes satelitales de Google Earth Pro
- Visor de Imágenes satelitales (Base map) del ArcMap (ArcGIS).

La vectorización y análisis de esta información se realizó en el software ArcGIS v.10.6, con la finalidad de limitar el ámbito espacial, elaborar el mapa base de campo, determinar el NDVI y analizar la concentración de nitratos en los cultivos de maíz.

3.5.2. Información cartográfica

- capa de centros poblados (INEI, 2017),
- capa de predios rurales, red vial (MINAGRI, 2019),
- red vial nacional y departamental (MTC, 2018),
- pendiente, geomorfología y clasificación de los suelos (IDE Cajamarca, 2021).

3.5.3. Programas (software)

- ArcGIS v.10.6,
- IBM SPSS Statistics 23,
- Microsoft Office (Word, Excel, PowerPoint),
- Google Earth Pro.

3.5.4. Materiales

- útiles de escritorio (papel bond, lapiceros, lápices, borradores, plumones, etc.),
- una (01) libreta de campo.

3.5.5. Equipos

- una (01) cámara fotográfica,
- una (01) laptop Toshiba AMD A8,
- un (01) Celular moto G6. Utilizado como GPS mediante la aplicación Polaris Navigation GPS, para la ubicación en campo de los puntos de muestreo.

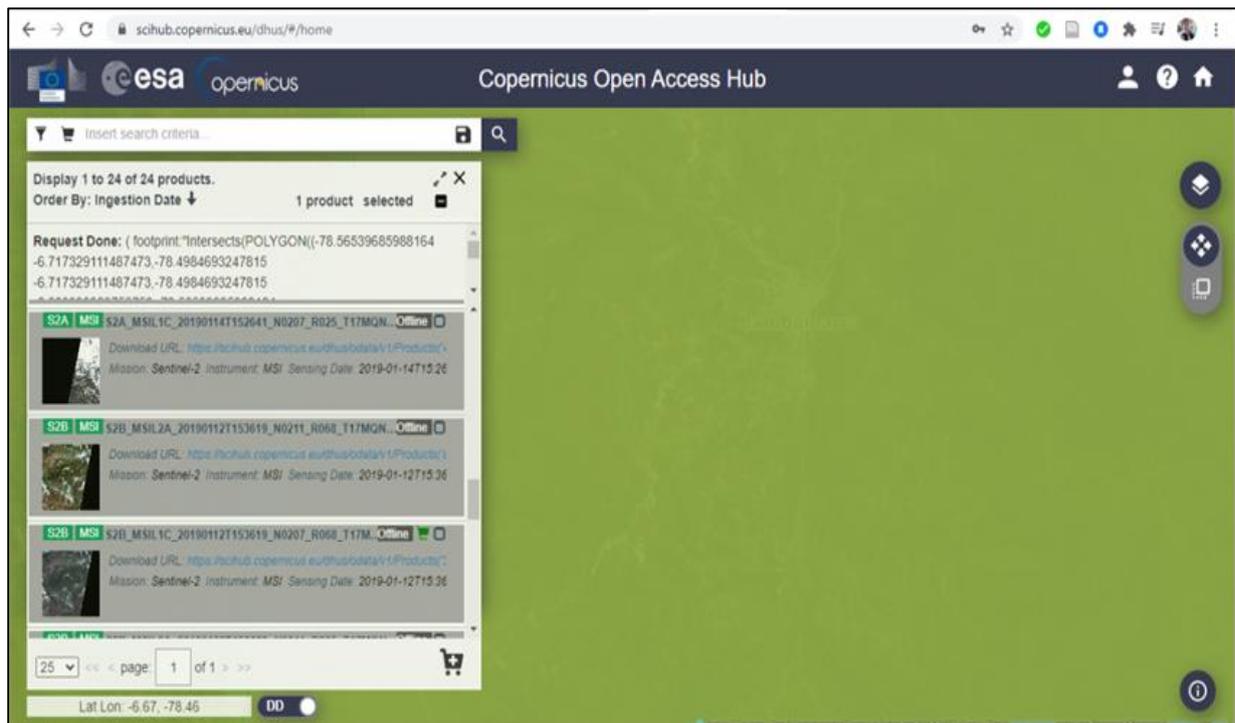
3.6. Procedimientos

El estudio se inicia con la búsqueda de información base del área de estudio dado por:

Imagen satelital: Para la imagen satelital los procesos realizados fueron: Verificación, y algunos recortes que cubran solo el área de estudio. Se utilizó una imagen satelital Sentinel 2B, obtenida del sitio web Copernicus Open Access Hub, página oficial de descargas de la ESA, la imagen descargada cuenta con un procesamiento de nivel L2A (imágenes corregidas atmosféricamente) y la fecha de toma de la imagen fue el 12 de enero de 2019, fecha más cercana a la toma de muestras en campo y la más óptima en cuanto a nubosidad. Siendo que el nivel de procesamiento es L2A, no fue necesario realizar los procesos de corrección de la imagen y la resolución es de 10 metros. Con las adecuaciones realizadas se prosigue a crear la banda artificial NDVI con la cual se mostrará nuestras áreas de vegetación.

Figura 5

Descarga de imágenes satelitales Sentinel 2



Nota. Página Web oficial de descargas de la ESA, Copernicus Open Access Hub. De ESA, 2020, Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>).

Cartografía base: Esta base cartográfica fue elaborada con información de libre disponibilidad como predios, red vial, centros poblados. La información utilizada para predios rurales fue la base cartográfica de Cofopri, la misma que en los últimos años maneja el Ministerio de Agricultura (2019). Esta base cartográfica se encontraba en el sistema de coordenadas PSAD 56, la misma que fue adecuada al sistema WGS 1984 con coordenadas UTM – zona 17 sur; posteriormente se realizaron algunas actualizaciones de la cartográfica ya que con el paso de los años se realizaron obras de infraestructura como la carretera principal que cruza por todo el centro poblado Mayhuasi modificando las dimensiones de los predios.

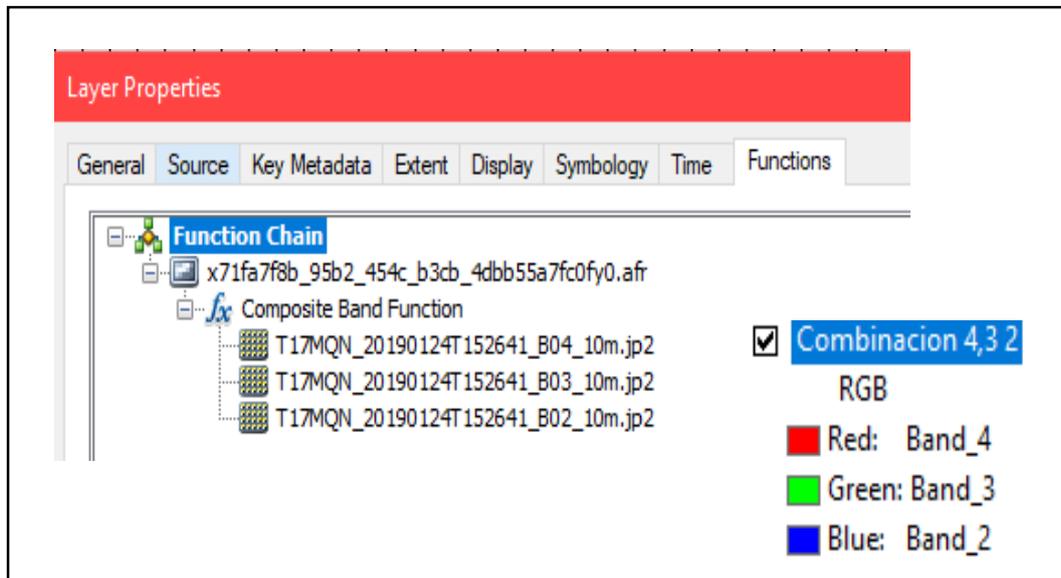
También se utilizó las capas de pendiente, geomorfología y clasificación de los suelos para determinar zonas homogéneas y así ubicar los puntos de muestreo. La cartografía base fue el insumo principal que permitió elaborar nuestro primer mapa base, donde se ubicaron los 4 puntos de muestreo de suelo. (ver Anexo 2)

3.6.1. Procedimientos para la identificación y cuantificación de parcelas con cultivos de maíz en el centro poblado Mayhuasi

Para identificar las parcelas con cultivos de maíz se utilizan las bandas 4, 3 y 2 de la imagen satelital Sentinel, se realiza la combinación de bandas en el mismo orden en el que fueron nombrados y se obtiene una imagen en color natural, posteriormente se procesa esta imagen y se realiza una clasificación de los principales componentes de la imagen ráster y así se identifica los posibles cultivos de maíz en el área de estudio.

Figura 6

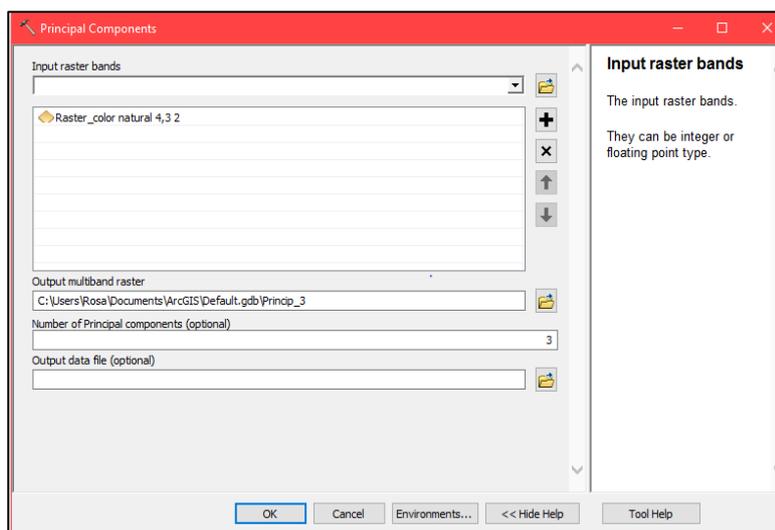
Combinación de bandas para generar un ráster en color natural



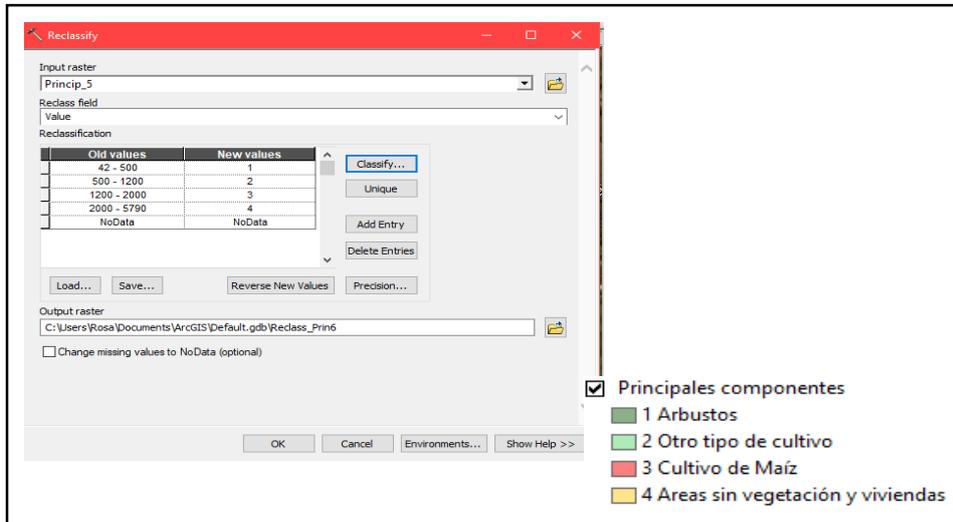
Nota. las bandas usadas para obtener una imagen en color natural son la 4, 3 y 2 con una resolución de 10 metros.

Figura 7

Generación de ráster de principales componentes de la imagen satelital



Nota. El procesamiento de la imagen satelital para principales componentes nos da una idea tentativa de las parcelas con cultivos de maíz, para ello se requiere contar con el ráster en color natural.

Figura 8*Reclasificación ráster de principales componentes*

Nota. la Reclasificación de los principales componentes facilita el análisis y nos permite identificar otro tipo de cultivos y componentes presentes en el área de estudio.

Para validar la ubicación de las parcelas de maíz que se había obtenido en el procesamiento de la imagen satelital se realizó también un trabajo de campo paralelo a la toma de muestras de suelo en el que se inventario todas las parcelas con cultivos de maíz. El insumo principal usado para este trabajo de campo fue el mapa base (ver Anexo 5), en el cual se registraron los apuntes que posteriormente se digitalizó y elaboró una base actualizada de las parcelas con cultivos de maíz.

Figura 9

Vista del centro poblado Mayhuasi



Nota. La foto fue tomada desde la parte más elevada del centro poblado Mayhuasi.

3.6.2. Procedimientos para la determinar la concentración de nitratos en el suelo en puntos específicos de parcelas representativas

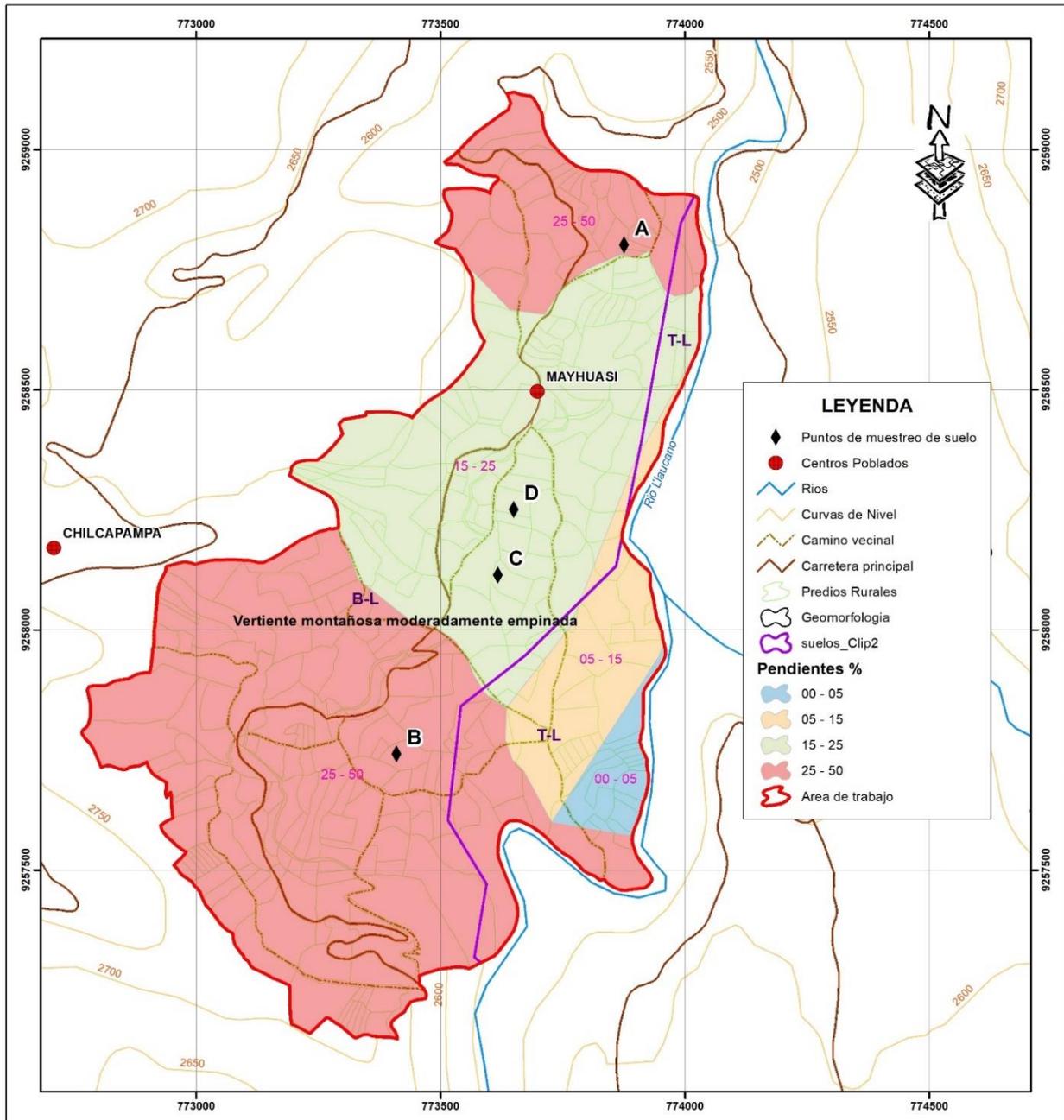
Para determinar los puntos específicos de parcelas representativas se realizó una delimitación de unidades homogéneas que contengan características similares, esto debido a que se tomó en cuenta la variabilidad espacial del suelo. Se consideraron tres aspectos principales: Pendiente, geomorfología y clasificación de los suelos de Cajamarca. Existe una disminución en la variabilidad al integrar distintas capas de información para seleccionar las zonas de muestreo. (Mallarino y Wittry, 2014 y Thompson et al., 2004)

Para la determinación de unidades homogéneas se empleó el programa ArcGis 10.6 y en base a una integración cartográfica se realizó el análisis espacial de la información obtenida de la infraestructura de datos espaciales publicada en la página web del Gobierno Regional de

Cajamarca en formato KML de la cual se tomaron en cuenta los siguientes factores:
Geomorfología; pendiente y tipo de suelos.

Figura 10

Integración cartográfica y análisis espacial para determinar áreas homogéneas



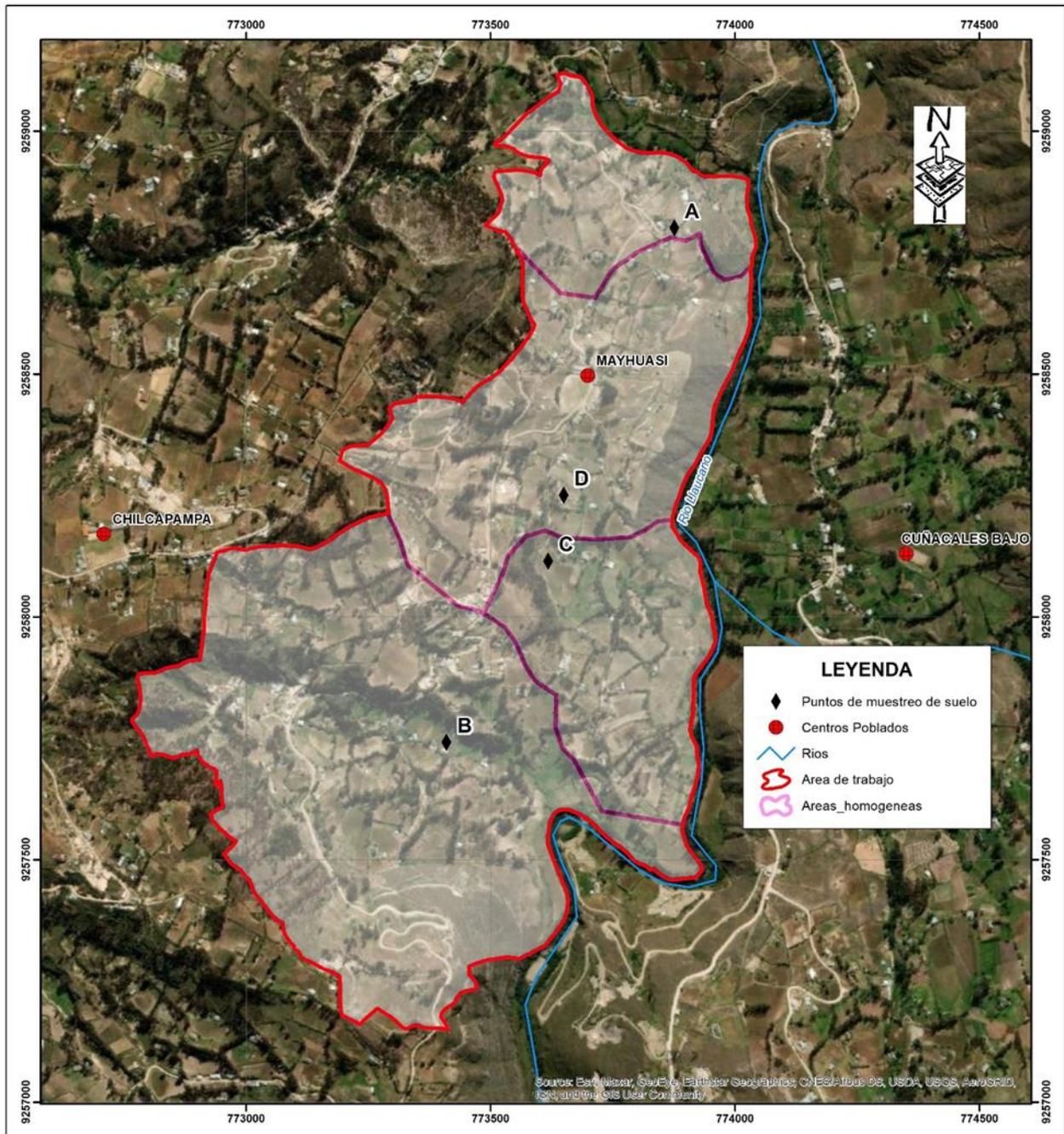
Nota. La integración cartográfica se realizó en base a las capas de pendientes, geomorfología y suelos.

Como parte de la metodología utilizada en el presente estudio se realizó una toma de muestras de suelo mediante calicatas con el fin de conseguir información relevante de las cuatro zonas homogéneas se definió un punto de observación para cada una, dando un total de cuatro puntos que fueron determinados a través de un muestreo al azar para cada zona y seleccionados en función de su accesibilidad y criterio del autor (ver figura 5). Debido a la disminución de variabilidad por el establecimiento de zonas homogéneas es un método satisfactorio para ser aplicado en este estudio (Schweizer, 2011).

Con la imagen satelital y la cartografía base definida se determinaron 4 sitios de muestreo (4 calicatas) que posteriormente fueron georreferenciados en la imagen satelital con la finalidad de conocer la relación sitio - pixel.

Figura 11

Zonas homogéneas y distribución de puntos de muestreo



Nota. Elegidas las cuatro zonas homogéneas se eligen también cuatro puntos de muestreo.

Figura 12

Puntos de muestreo georreferenciados en la imagen satelital



Nota. Las muestras de suelo se tomaron para determinar la concentración de nitratos en los 4 puntos establecidos.

Después de haber determinado los puntos específicos de muestreo de suelo en gabinete se realizó el trabajo de campo. La toma de muestras representativas se realizó de acuerdo a la Guía para Muestreo de Suelos en el marco del D.S. 002-2013-MINAM ECA para Suelos, donde se establecen materiales y métodos necesarios para la recolección adecuada de muestras. En base a la información de estas guías, se determinó la profundidad de 0 a 30 cm y de 30 a 60 cm, debido a que este estudio se enfoca a suelos agrícolas y en el estrato superficial se encuentran la mayoría de nutrientes y propiedades características del suelo. La toma de muestras a dos diferentes alturas se debe a que se quiere comprobar el estrato de suelo más representativo para la concentración de Nitrógeno. Como principal actividad se llevó a cabo la toma de muestras en los 4 puntos establecidos con una profundidad de 0-30 y 30-60 cm. Previo

a la toma de muestras se realizó una visita de campo para corroborar la ubicación de los puntos preestablecidos, verificando su accesibilidad en el terreno y también tomando en cuenta el uso y cobertura del suelo.

En la recolección de muestras se georreferenció cada punto con la ayuda de la aplicación "Polaris Navigation" instalada en un celular móvil moto G6, con precisión de ± 3 metros.

Figura 13

Toma de muestras del punto "A"



Nota. En el punto "A" se tomaron muestras de suelo a dos profundidades de 0-30 cm y de 30-60 cm.

Figura 14

Toma de muestras del punto "B"



Nota. En el punto "B" se tomaron muestras de suelo a dos profundidades de 0-30 cm y de 30-60 cm.

Figura 15

Toma de muestras del punto "C"



Nota. En el punto "C" se tomaron muestras de suelo a dos profundidades de 0-30 cm y de 30-60 cm.

Figura 16

Toma de muestras del punto "D"



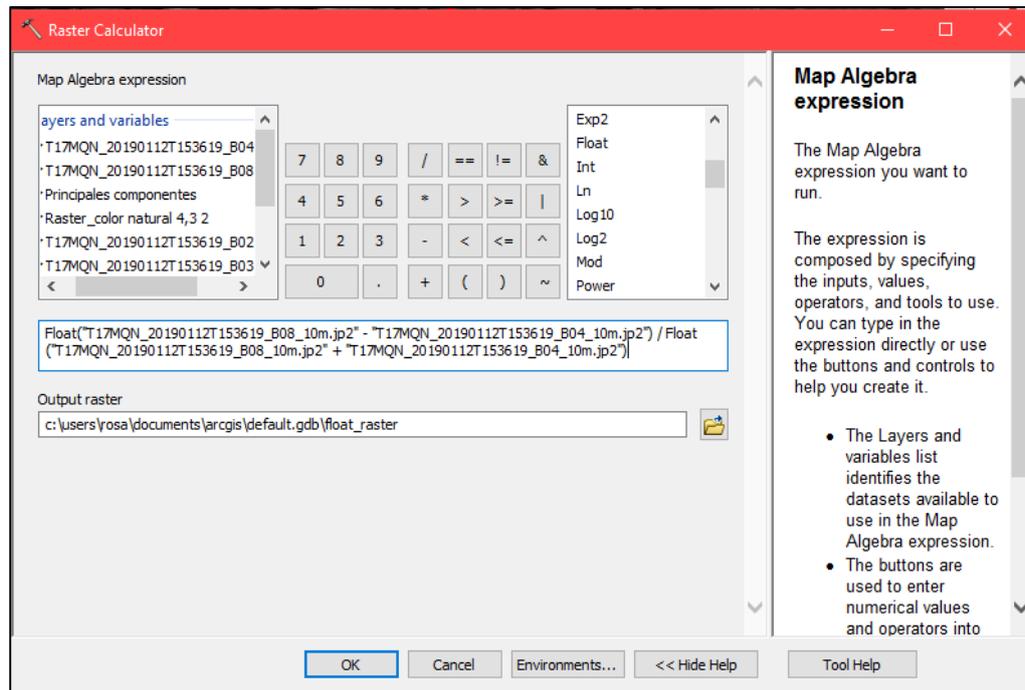
Nota. En el punto "D" se tomaron muestras de suelo a dos profundidades de 0-30 cm y de 30-60 cm.

3.6.3. Procedimientos para realizar el diagnóstico comparativo preliminar del NDVI utilizando imágenes de satélite Sentinel

Para realizar el diagnóstico comparativo preliminar del NDVI en toda el área de estudio, se utilizaron las bandas 4 y 8 de la imagen satelital Sentinel

Figura 17

Calculadora ráster para determinar el NDVI



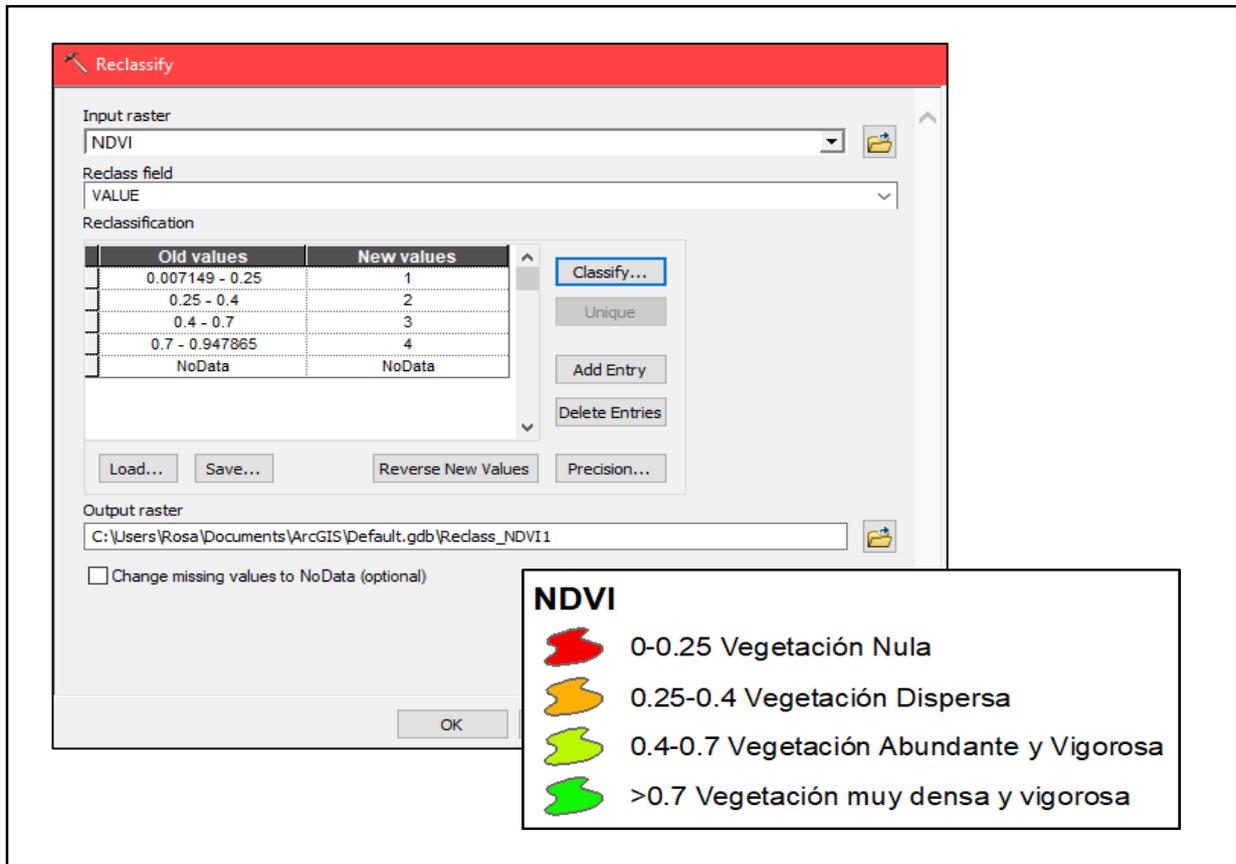
Nota. El ráster del NDVI se obtiene procesando las bandas 4 y 8 de 10 metros de resolución.

Para realizar el diagnóstico y a la vez tener un mayor análisis se reclasificó esta capa en 4 clases de tal manera que permita diferenciar las áreas con vegetación nula, áreas con vegetación dispersa, áreas con vegetación abundante y vigorosa y las áreas con vegetación muy densa y vigorosa.

En nuestra área de estudio el NDVI varía entre los valores 0 a 0.7. (ver Anexo 7)

Figura 18

Reclasificación de la capa ráster del NDVI



Nota. La reclasificación de la capa ráster se dio en cuatro intervalos los cuales permiten desarrollar un mejor análisis.

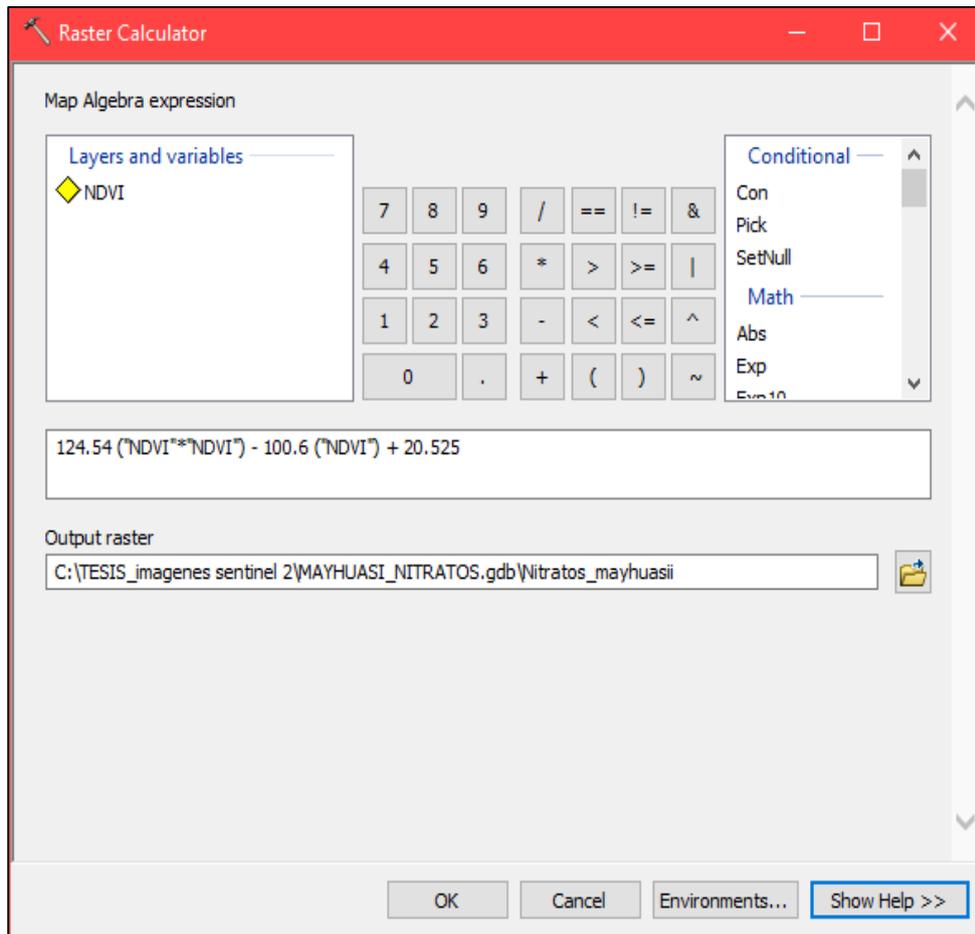
3.6.4. Procedimientos para la elaboración de un modelo matemático que permita determinar la concentración de nitratos depositados en el suelo

En esta etapa final se procede a validar los modelos y a elegir el más representativo y con ello generar la nueva capa de concentración de los nitratos del suelo y así elaborar el análisis respectivo.

Los modelos matemáticos generados se calculan en un formato ráster utilizando el software gis.

Figura 19

Calculadora ráster para aplicar el modelo 1



Nota. De la aplicación del Modelo 1 se obtiene la concentración de los nitratos en el suelo en base de la capa NDVI.

Después de haber calculado el modelo en la imagen ráster se procede a reclasificar la imagen en cuatro clases representativas

Figura 20

Reclasificación para la concentración de nitratos en parcelas de maíz

The screenshot shows the ArcGIS Reclassify dialog box. The input raster is 'nitrato_maiz' and the reclass field is 'VALUE'. The reclassification table is as follows:

Old values	New values
0.20952 - 5	1
5 - 10	2
10 - 20	3
20 - 31.357336	4
NoData	NoData

The output raster is 'C:\Users\Rosa\Documents\ArcGIS\Default.gdb\Reclass_nitr3'. The legend for the reclassified data is:

Concentración de Nitratos en cultivos de Maíz

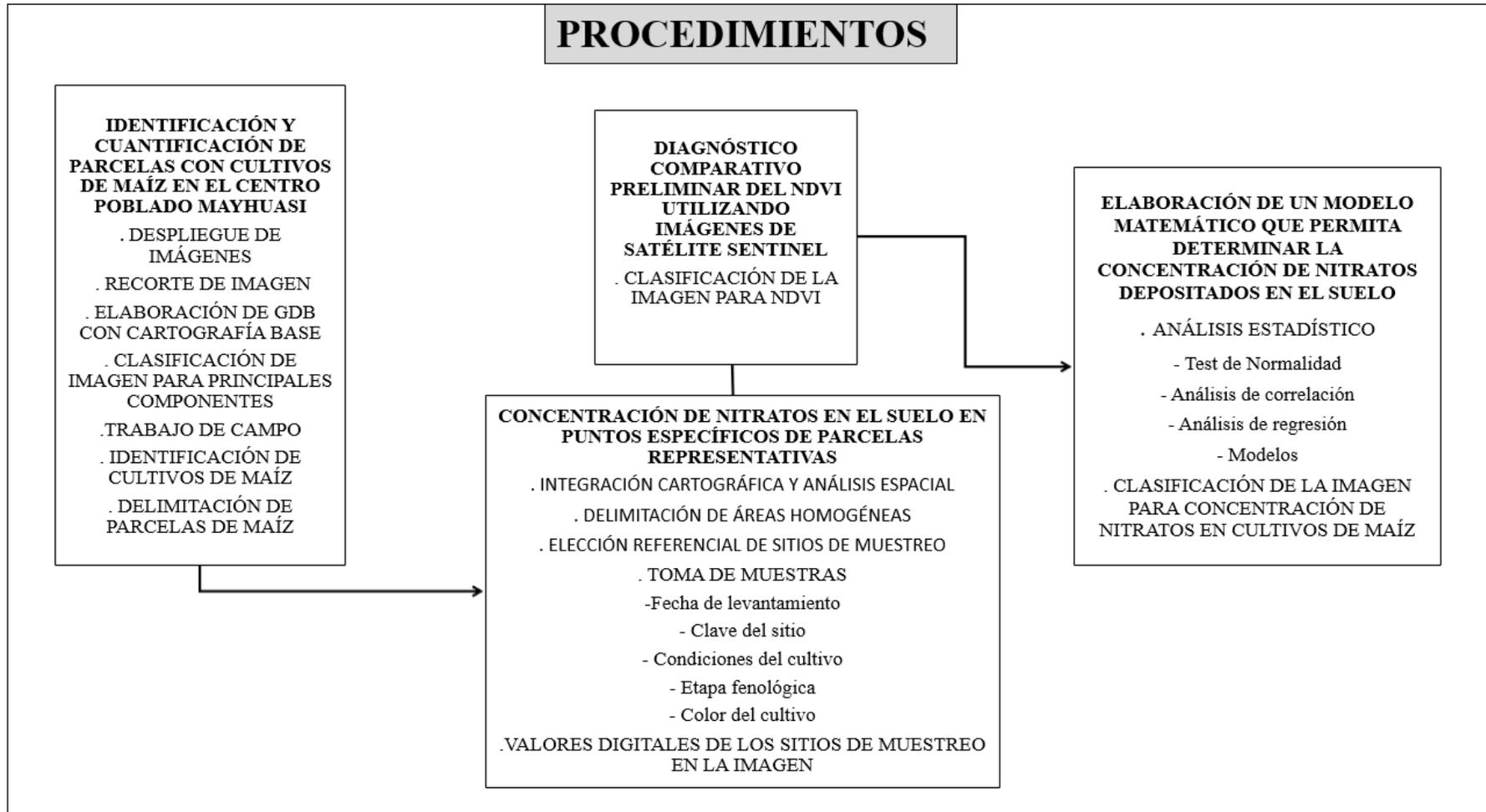
Clase (ppm)

- 1 (<5)
- 2 (5-10)
- 3 (10-20)
- 4 (>20)

Nota. en la reclasificación de la capa de concentración de nitratos se utilizó cuatro intervalos de análisis.

Figura 21

Procedimientos realizados en la investigación



Nota. Se detalla los procedimientos más importantes para cada etapa de manera sintetizada.

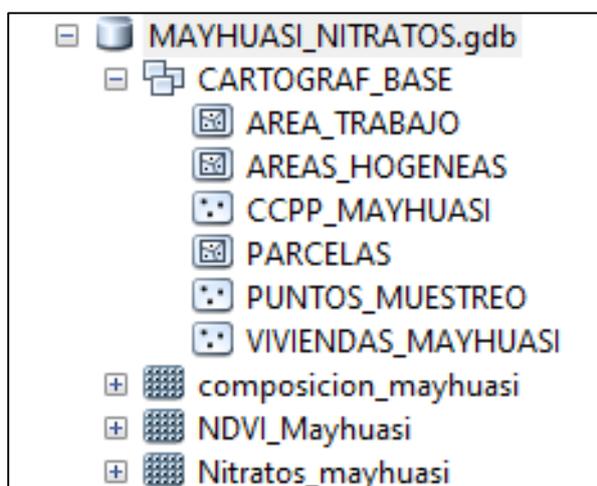
3.7. Análisis de datos

3.7.1. Análisis cartográfico

En el análisis de datos se utilizó la información recabada de campo que previamente fue digitalizada y ordenada en una base de datos, para ello se utilizó el software ArcGIS 10.6, donde se elaboró una GDB denominada “MAYHUASI_NITRATOS.gdb” y fue aquí donde se almacenó toda la información por capas específicas.

Figura 22

GDB con información cartográfica



Nota. La base de datos se estructuró en el software ArcGIS 10.6 con una extensión en GDB.

El procesamiento de la imagen satelital Sentinel se realizó en el software ArcGIS 10.6, como resultado se obtuvo el NDVI, al finalizar con la obtención del modelo se calculó la concentración de los nitratos por cada píxel de la imagen satelital para todas las parcelas de maíz.

El análisis cartográfico previo para la determinación de los puntos de muestreo también se realizó en este Software y en el tramo final se elaboraron los mapas temáticos que muestran los resultados de la investigación.

3.7.2. Análisis geoestadístico

Para realizar el análisis geoestadístico se utilizó la información obtenida del análisis de laboratorio de las muestras de suelos para en los cuatro puntos de muestreo y los datos NDVI obtenidos del procesamiento de la imagen satelital. Se utilizó el software IBM SPSS Statistics 23, para todo el análisis estadístico y en la parte final del análisis también se usó el programa Excel 2016 para elaborar los gráficos de los modelos.

Tabla 7

NDVI y NO₃ de 0-30 cm de profundidad del suelo

Punto	Subpunto (0-30 cm)	NDVI	NO₃ (ppm)
A	A1	0.54	2.50
B	B1	0.57	3.80
C	C1	0.33	0.89
D	D1	0.33	0.90

Tabla 8

NDVI y NO₃ de 30-60 cm de profundidad del suelo

Punto	ubpunto (30-60 cm)	NDVI	NO₃ (ppm)
A	2	0.54	1.36
B	2	0.57	1.79
C	2	0.33	0.98
D	2	0.33	1.27

Con los datos de Nitratos y NDVI se procede a validar la relación sitio y píxel, para ello el primer paso fue determinar si las variables presentan una distribución normal, luego evaluar la correlación y posteriormente determinar la regresión más conveniente y el modelo matemático que más se ajuste al presente estudio. Todas las pruebas realizadas para el ajuste del modelo fueron mapeadas en el software ArcGIS con la finalidad de realizar un mejor análisis.

3.7.2.1. Distribución normal - prueba de Shapiro–Wilk. Esta prueba se ejecutó para determinar si las variables NDVI y nitratos, cuentan con una distribución normal. La prueba a usar corresponde a Shapiro Wilk, pues la cantidad de muestras con la que se cuenta es menor a 50.

3.7.2.1.1. Test de Normalidad para NDVI. El test se realiza con los datos obtenidos de la imagen satelital de acuerdo a los 4 puntos de muestreo.

Tabla 9

Test de normalidad para NDVI

Test of normality						
	Kolmogorov-Smirnov^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig
NDVI	0.306	4	.	0.782	4	0.074
Lilliefors Significance Correction						

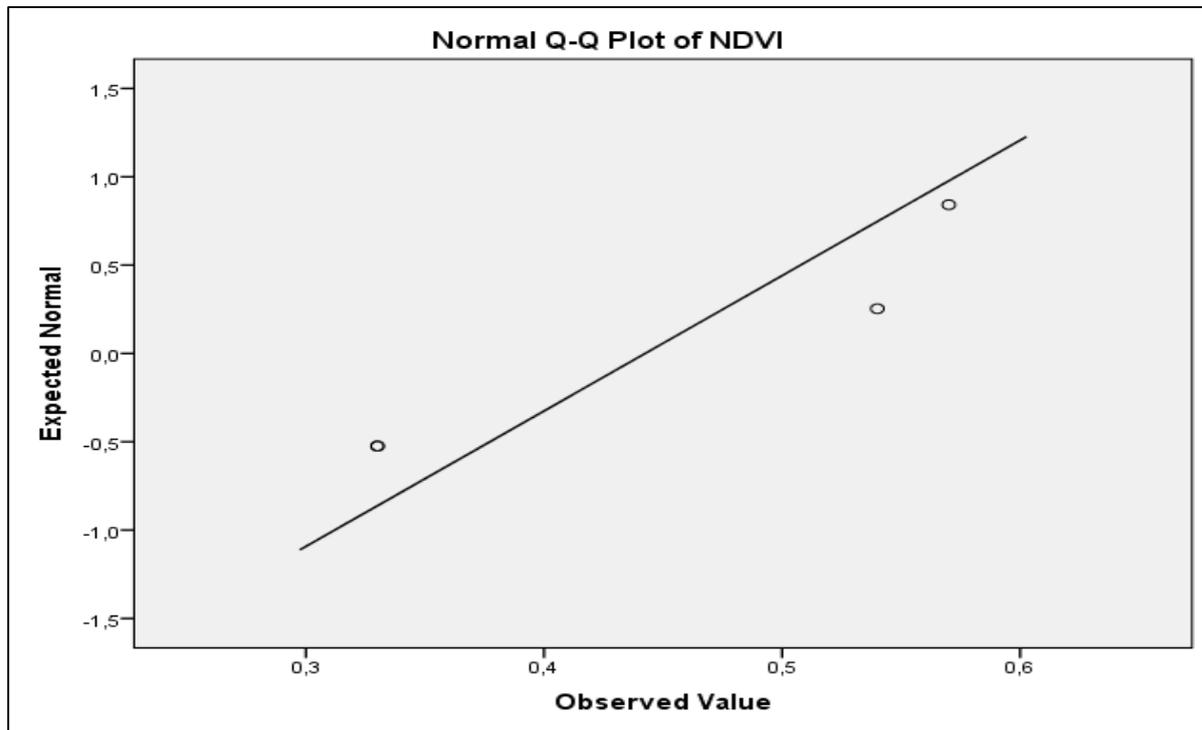
Nota. La prueba usada fue Shapiro –Wilk con una significancia de 0.074.

El nivel de significancia es 0.074 el cual se encuentra por encima del mínimo aceptable (0.05).

Esto nos lleva a concluir que los datos de la variable NDVI guarda una distribución Normal, a continuación de aprecia el gráfico de la variable.

Figura 23

Distribución normal de datos NDVI



Nota. La línea que se ajusta a los puntos del NDVI indica una tendencia normal.

3.7.2.1.2. Test de normalidad para nitratos del suelo (NO_3). El test se realiza con los datos obtenidos de las muestras de suelo, aquí tendremos dos evaluaciones puesto que contamos con dos niveles de toma de datos, de 0-30 cm y de 30-60 cm de profundidad del suelo.

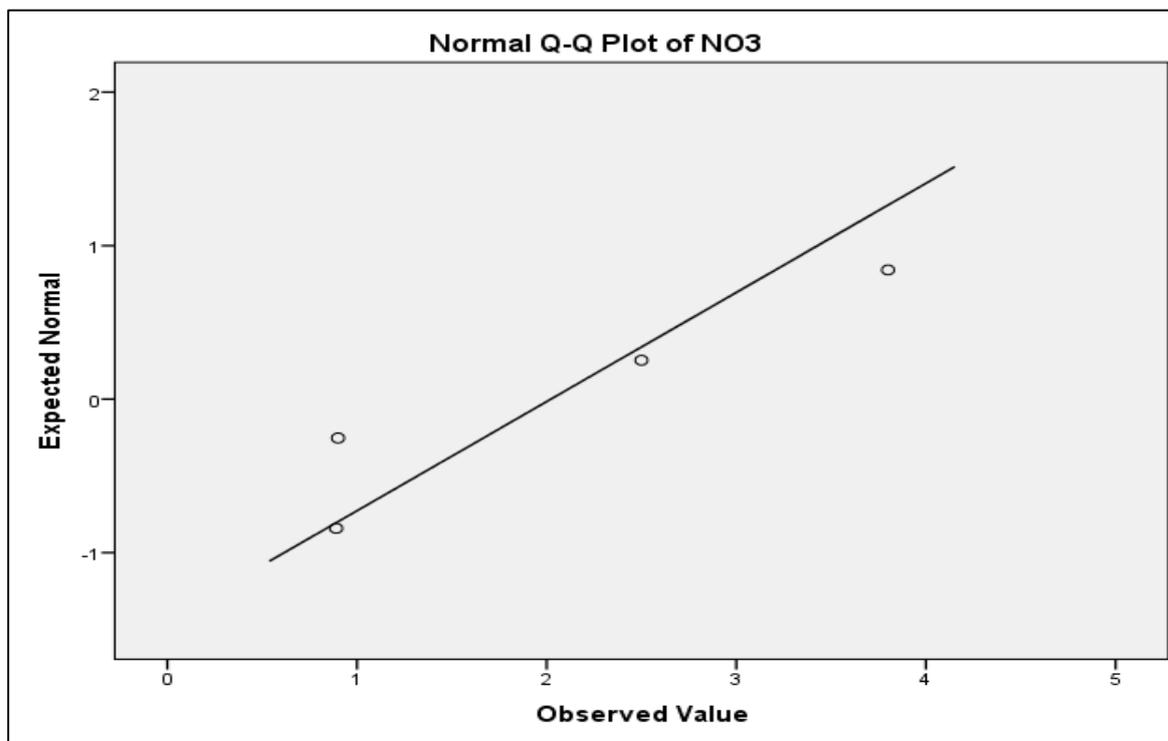
Tabla 10*Test de normalidad para nitratos (NO₃)*

Test of normality						
NO ₃ profundidad (cm)	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	Df	Sig.	Statistic	df	Sig.
0-30	0.288	4	.	0.866	4	0.282
30-60	0.238	4	.	0.970	4	0.840

Lillie for Significance Correction

Nota. La prueba usada fue Shapiro - Wilk y fue aplicada para los datos de las dos profundidades de manera independiente.

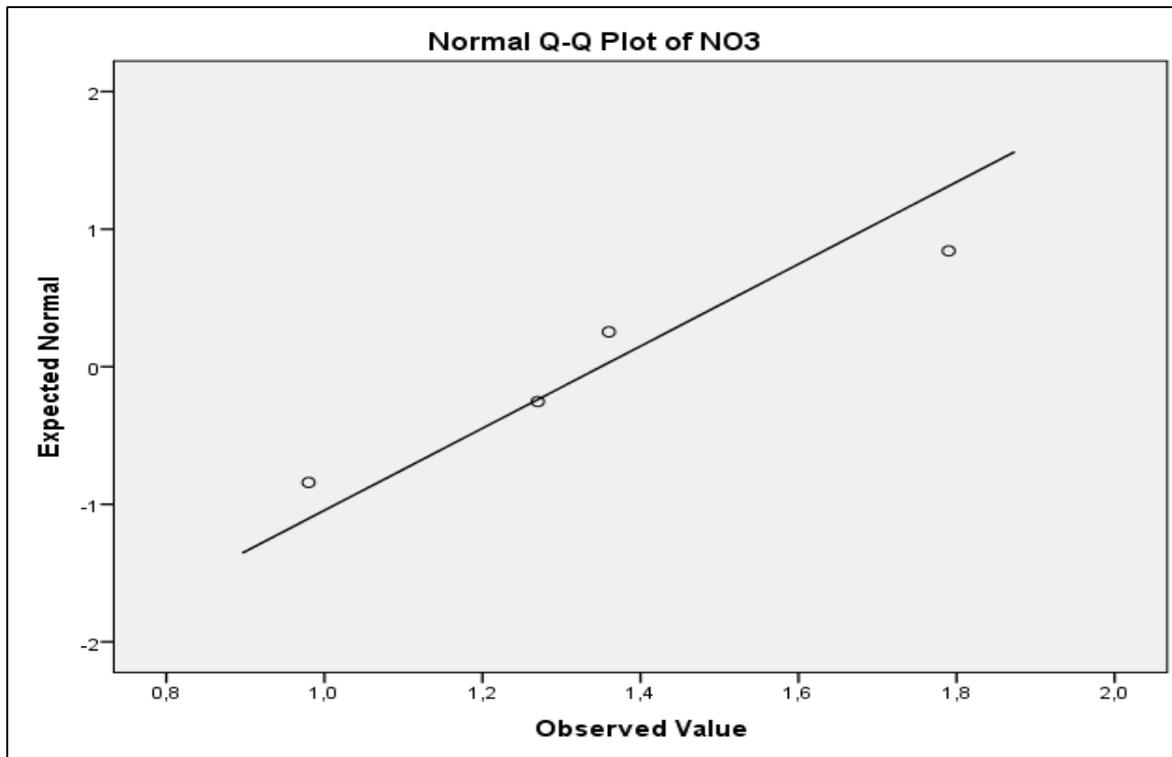
De la Tabla 10 se tiene que el nivel de significancia para nitratos de 0-30 cm es 0.282 y de 30-60 cm es 0.840; en ambos casos el test corrobora que los datos de la variable nitratos siguen una distribución normal.

Figura 24*Distribución normal de datos NO₃ para suelos de 0-30 cm de profundidad*

Nota. La línea que se ajusta a los puntos de NO₃ indica una tendencia normal.

Figura 25

Distribución normal de datos NO₃ para suelos de 30-60 cm de profundidad



Nota. La línea que se ajusta a los puntos de NO₃ indica una tendencia normal.

3.7.2.2. Correlación estadística. El análisis de correlación se realizó para medir el grado de relación entre el NDVI de la imagen de satélite Sentinel y los nitratos del suelo obtenidos del análisis de laboratorio para puntos específicos; siendo que ambas variables tienen una distribución normal se utiliza una correlación paramétrica (Pearson). El proceso se divide en dos etapas ya que los datos de nitratos varían de acuerdo al estrato de profundidad del suelo en el que fueron tomadas las muestras. El análisis de correlación fue elaborado en el Software SPSS mediante estadísticos.

3.7.2.2.1. Correlación NDVI y NO₃ (muestras 0-30 cm de profundidad). El nivel de correlación entre ambas variables es alto con un 0.957 y una significancia de 0.043 el cual es menor a 0.05 (máximo esperado), por lo cual se descarta la hipótesis nula y se determina que tanto el NDVI como los nitratos del suelo para el estrato de 0-30 cm están relacionados con un 95% de confianza.

Tabla 11

Correlación NDVI y NO₃ para muestras 0-30 cm de profundidad

Correlations		NDVI	NO ₃
NDVI	Pearson Correlation	1	0.957*
	Sig. (2-tailed)		0.043
	N	4	4
NO ₃	Pearson Correlation	0.957*	1
	Sig. (2-tailed)	0.043	
	N	4	4

Nota. Las variables NDVI y NO₃ (0-30 cm de profundidad) tienen un alto nivel de correlación, esto se verifica aplicando el método de Pearson para datos con distribución normal.

3.7.2.2.2. Correlación NDVI y NO₃ (muestras 30-60 cm de profundidad). El nivel de correlación es alto entre ambas variables con un 0.821, sin embargo, la significancia es de 0.179, por ello se acepta la hipótesis nula y se determina que el NDVI no guarda relación con la concentración de nitratos de las muestras del suelo para las muestras tomadas de 30-60 cm pues la significancia es mayor al 0.05 mínimo esperado.

Tabla 12

Correlación NDVI y NO₃ para muestras 30-60 cm de profundidad

Correlations		NDVI	NO ₃
NDVI	Pearson Correlation	1	0.821
	Sig. (2-tailed)		0.179
	N	4	4
NO ₃	Pearson Correlation	0.821	1
	Sig. (2-tailed)	0.179	
	N	4	4

Nota. Las variables NDVI y NO₃ (30-60 cm de profundidad) tienen un alto nivel de correlación, esto se verifica aplicando el método de Pearson para datos con distribución normal.

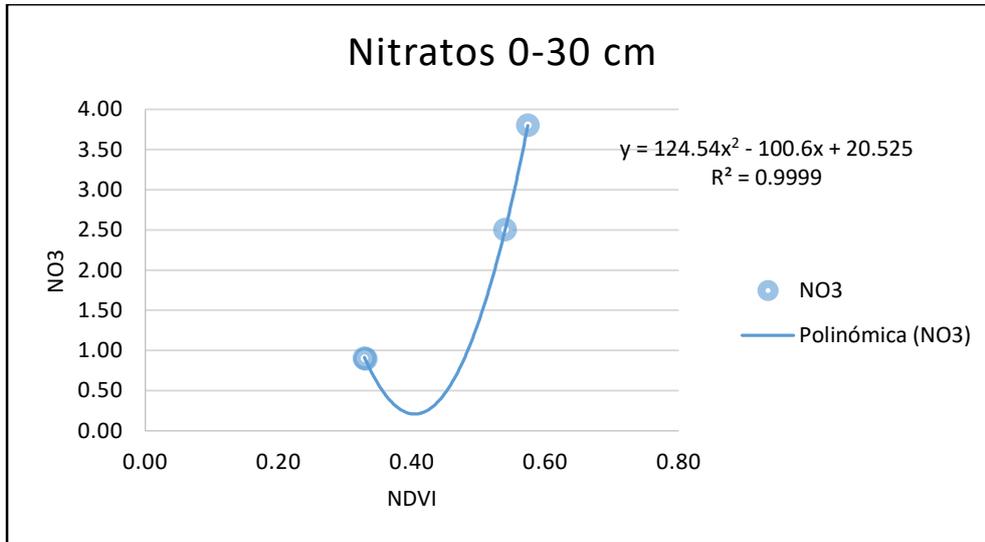
3.7.2.3. Modelo de regresión. Finalizadas las pruebas de correlación que nos indican la relación existente entre el NDVI de la imagen satelital y los nitratos de las muestras de suelo, se procede a crear los modelos que representen dicha correlación.

3.7.2.3.1. Regresión polinomial. El modelo de regresión polinomial es el que presenta mejores resultados.

Para el estrato de profundidad del suelo de 0-30 cm se muestra la Figura 27 que contiene el grafico y la ecuación propuesta.

Figura 26

Regresión polinomial - NDVI y NO₃ de 0-30 cm de profundidad del suelo.

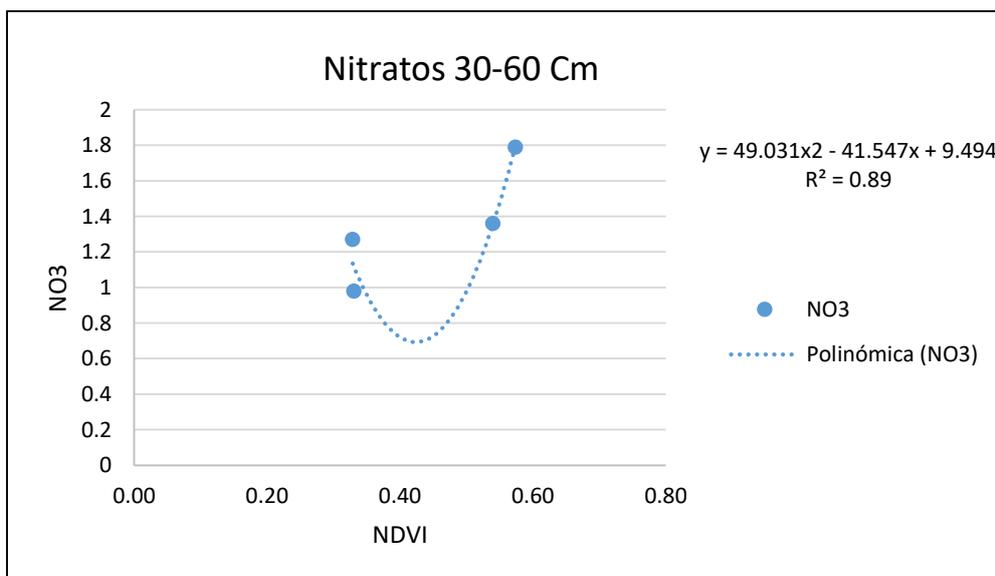


Nota. La regresión polinomial es la que mejor se ajusta a nuestros datos con un $R^2 = 0.999$.

Para el estrato de profundidad del suelo de 30-60 cm, también se utilizó un modelo de regresión polinomial y se muestra en la Figura 28.

Figura 27

Regresión polinomial - NDVI y NO₃ de 30-60 cm de profundidad del suelo



Nota. La regresión polinomial es la que mejor se ajusta a nuestros datos con un $R^2 = 0.89$.

Del análisis de la regresión polinomial para ambos estratos de profundidad del suelo se obtuvieron los dos modelos estadísticos para la representación de la variable concentración de nitratos del suelo.

IV. Resultados

El centro poblado Mayhuasi; como área de estudio; geográficamente se encuentra localizado en el distrito de Bambamarca, provincia de Hualgayoc - Cajamarca. Específicamente en el Sistema de coordenadas universal transversal de Mercator (UTM) N 9259146 a 9257123 y E 772695 a 774036, a una altitud aproximada de 2629.2 msnm. (ver Anexo 6).

Este centro poblado tiene una vía de acceso principal que lo comunica directamente con la ciudad de Bambamarca y sirve como medio para poder transportar los productos de la zona como maíz, frejol, habas, papa, cebada, entre otros; los mismos que son el principal sustento de las familias. El tiempo aproximado de viaje en carro es de 10 minutos y caminando de un aproximado de 40 minutos.

En el centro poblado Mayhuasi también encontramos un único colegio de educación inicial y primaria utilizado netamente por los niños del área de estudio.

Bordeando el centro poblado se encuentra el río Llaucano, el cual se mantiene activo todo el año, pero que por su ubicación sus aguas solo son usadas por los pobladores que tienen sus parcelas muy cercanas a la ribera del río, la pendiente del centro poblado dificulta el traslado de las aguas a las partes altas del área de estudio, es por ello que los cultivos de maíz normalmente no reciben riego, solo se aprovecha el agua de las lluvias.

Procesando la imagen satelital y validando con la información obtenida en campo se obtuvieron los resultados de acuerdo a los objetivos específicos propuestos en el presente estudio.

4.1. Identificación y cuantificación de parcelas con cultivos de maíz en el centro poblado

Mayhuasi

Con el trabajo de campo realizado se determinaron correctamente las parcelas de maíz, con una base de datos georreferenciada y como resultado se obtuvo que en el centro poblado Mayhuasi (área de estudio) existen en total 173 parcelas de cultivos de maíz con un área de 29.87(ha) y que representa un 23,43% del área total y a pesar que este porcentaje no supera el 50% cabe resaltar que el maíz es uno de los cultivos más representativos de la zona. El 76.57% restante corresponde a parcelas con otros cultivos u terrenos en descanso, vegetación arbustiva y laderas de cerros. (ver Figura 29)

Tabla 13

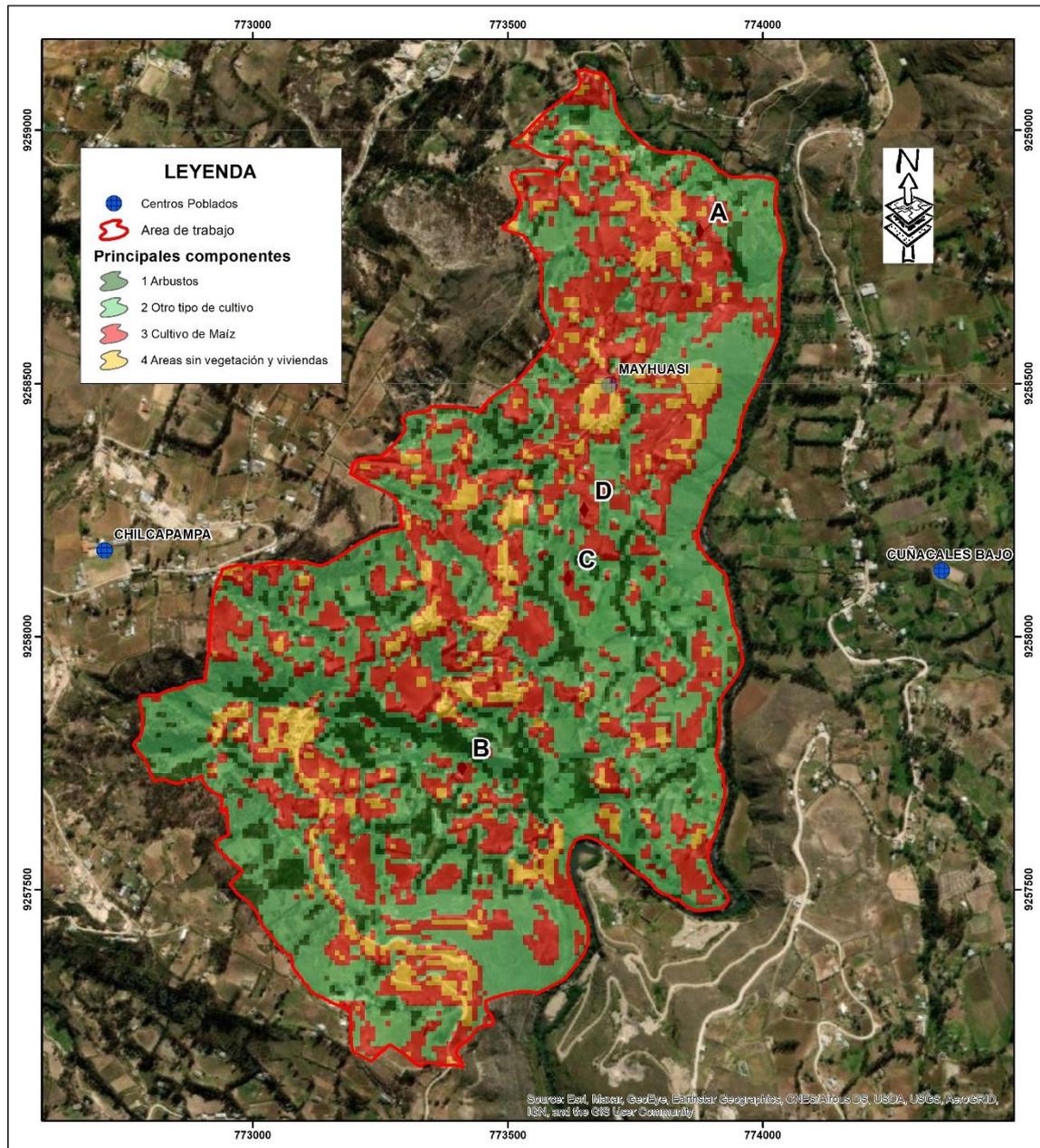
Parcelas de maíz del centro poblado Mayhuasi

Parcela	Cantidad	Área (ha)	%
Maíz	173	29.87	23.43
Otros cultivos y terrenos en descanso		97.63	76.57
Área total del centro poblado Mayhuasi	-	127.50	100

Nota. La identificación y cuantificación de parcelas se realizó mediante procesamiento de la imagen satelital y el trabajo de validación en campo.

Figura 28

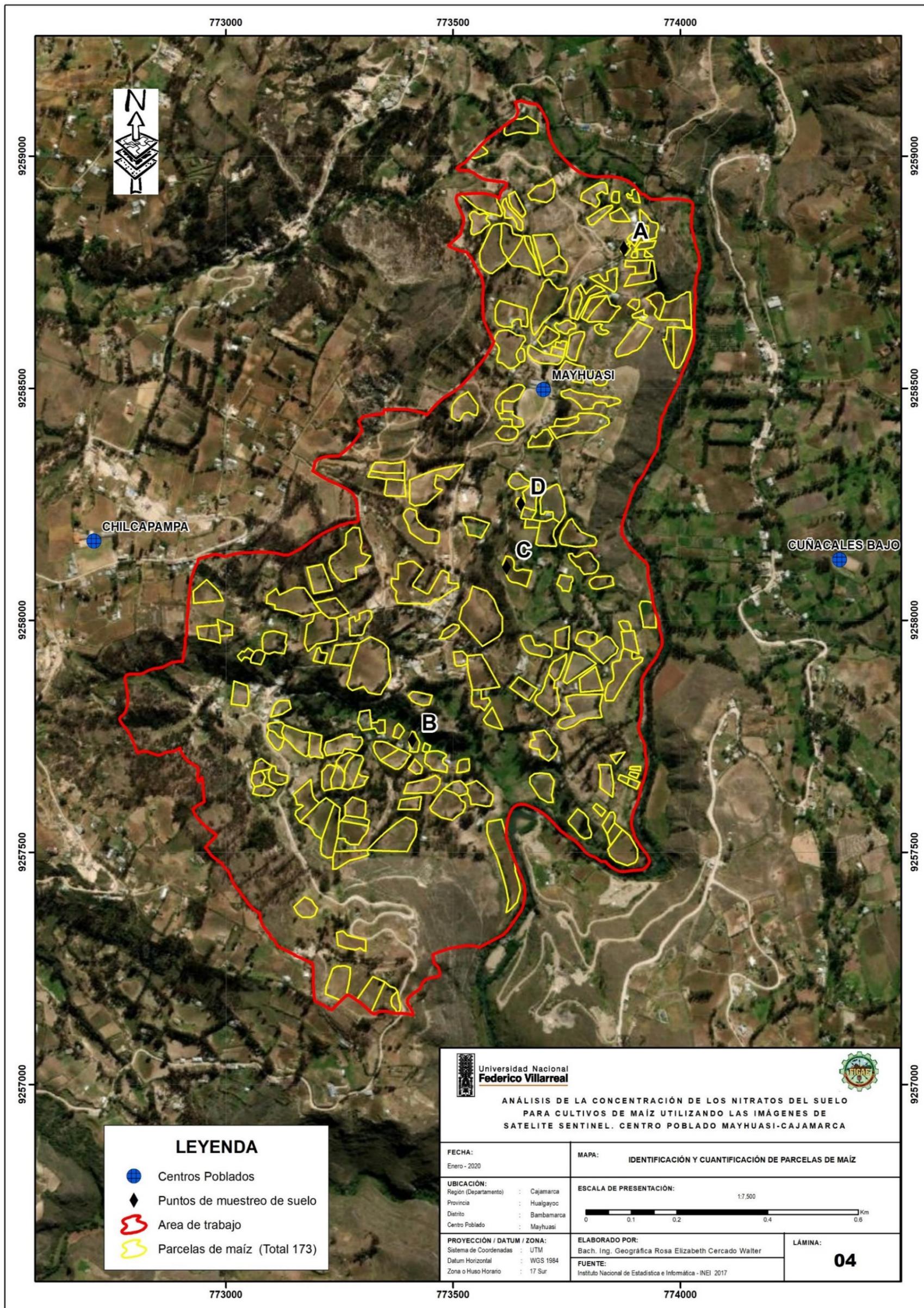
Ráster de los principales componentes de la imagen satelital



Nota. El ráster de los principales componentes permitió elaborar una capa en formato polígono que representa a las parcelas con cultivos de maíz.

Figura 29

Mapa de identificación y cuantificación de parcelas de maíz



4.2. Determinación de la concentración de nitratos en el suelo en puntos específicos de parcelas representativas

4.2.1. Análisis de laboratorio

Las muestras de suelo tomadas en campo fueron llevadas al laboratorio de suelos de la Universidad Nacional Agraria la Molina para el análisis de Nitrógeno nítrico y Nitrógeno amoniacal, del cual se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 14. (ver Anexo 4).

Tabla 14

Resultados de laboratorio del análisis de las muestras de suelo

Punto	Subpunto	Profundidad (cm)	NO₃	NH₄
A	A1	0-30	2.50	11.2
	A2	30-60	1.36	11.2
B	B1	0-30	3.80	19.6
	B2	30-60	1.79	19.6
C	C1	0-30	0.89	14.0
	C2	30-60	0.98	19.6
D	D1	0-30	0.90	19.6
	D2	30-60	1.27	16.8

Nota. se muestran los resultados del análisis de suelos para los cuatro puntos de monitoreo en los dos estratos de profundidad de 0-30 cm y 30-60 cm.

Como parte de los resultados del análisis de laboratorio también se tiene datos de nitratos y de amonios que permiten calcular el aporte de nitrógeno inorgánico por cada punto de muestreo y a su vez por estrato de profundidad.

Sabiendo que el requerimiento del nitrógeno inorgánico durante todo el ciclo vegetativo del maíz es de 300 ppm y para la fase fenomenológica entre los 30 y 60 días se necesita un 38.5 %, se estima que la cantidad de nitrógeno inorgánico necesario sería de 115.5 ppm.

Tabla 15*Cantidad de nitrógeno inorgánico*

Punto	Subpunto	Profundidad (cm)	N
A	A1	0-30	13.70
	A2	30-60	12.56
B	B1	0-30	23.40
	B2	30-60	21.39
C	C1	0-30	14.89
	C2	30-60	20.58
D	D1	0-30	20.50
	D2	30-60	18.7

De la Tabla 15 se obtuvo la cantidad de nitrógeno inorgánico para todos los puntos de muestreo y su estrato de profundidad, el cual no es suficiente para satisfacer las necesidades del cultivo de maíz en esta etapa fenomenológica, por ende, se puede decir también que la cantidad de nitratos en estos puntos es insuficiente, siendo necesario una fertilización nitrogenada.

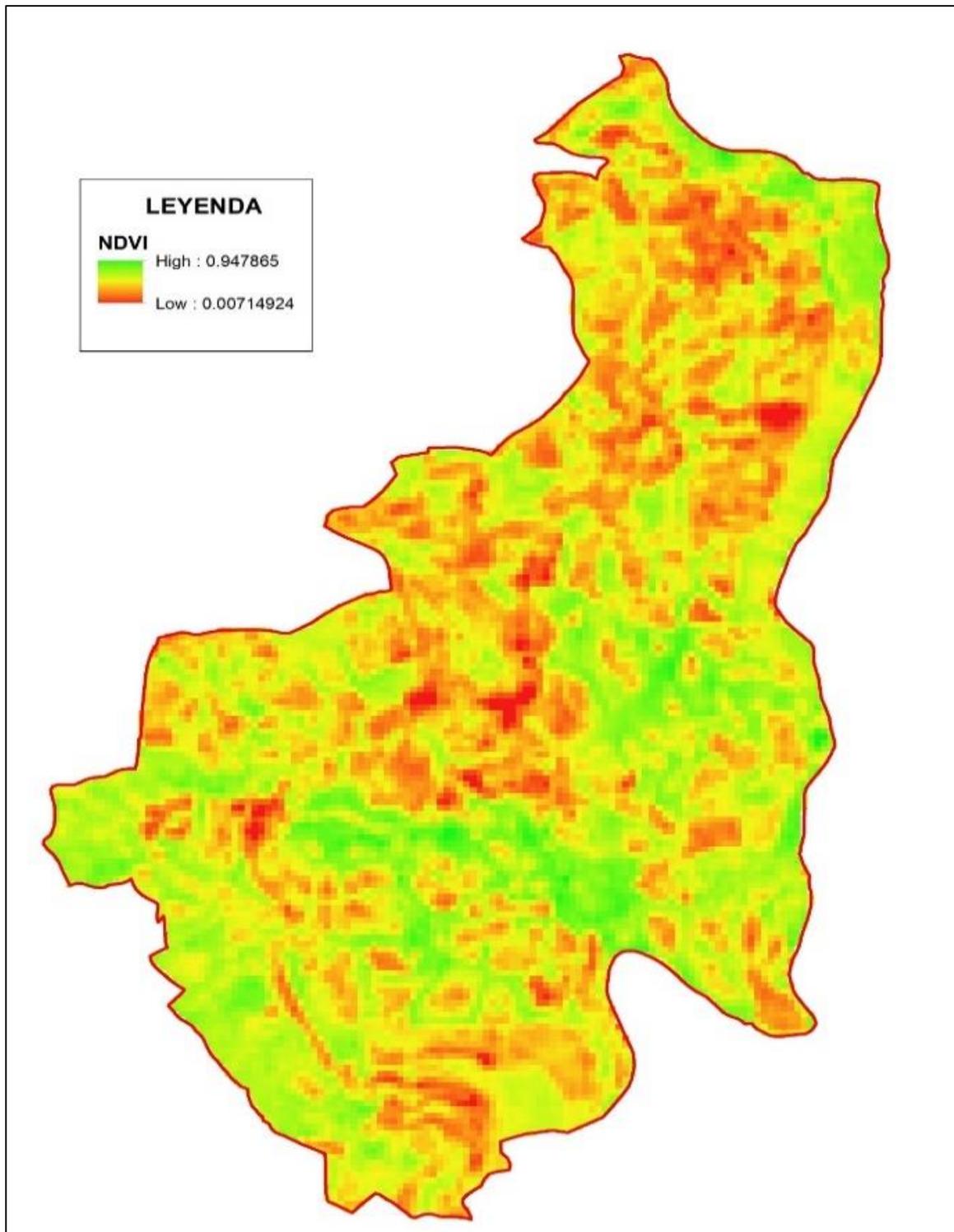
4.3. Diagnóstico comparativo preliminar del NDVI utilizando imágenes de satélite

Sentinel

En el diagnóstico preliminar se obtuvo una imagen ráster donde los valores del NDVI varían desde los 0.007 a los 0.947. El NDVI se muestra en una escala de verdes y rojos donde los verdes son áreas con vegetación abundante y vigorosa y los rojos representan vegetación nula, dispersa o menos vigorosa. (ver Figura 30).

Figura 30

Capa ráster preliminar del NDVI para el centro poblado Mayhuasi



Nota. Ráster preliminar del NDVI en escala de colores y sin reclasificación.

Posteriormente se diferenciaron en 4 intervalos de NDVI para determinar el tipo de vegetación que se tiene en la zona de estudio. (ver Figura 31)

Tabla 16

Porcentaje por área para intervalos de NDVI

NDVI	DESCRIPCIÓN	Área (ha)	%
0 - 0.25	Vegetación Nula	3.11	2.44
0.25 - 0.4	Vegetación dispersa	19.78	15.54
0.4 - 0.7	Vegetación abundante y vigorosa	83.10	65.29
> 0.7	Vegetación muy densa y vigorosa	21.28	16.72
	Total, general	127.26	100.00

Nota. Los valores para NDVI varían entre -1 a 1, sin embargo, en nuestra área de estudio solo se tienen valores mayores a 0.

4.3.1. Vegetación nula (NDVI 0 - 0.25)

Corresponde a áreas sin vegetación y de acuerdo a lo observado en campo son netamente agrupaciones de viviendas, le corresponde a este grupo el 2.44 % del total de área del centro poblado Mayhuasi.

4.3.2. Vegetación dispersa (NDVI 0.25 -0.4)

De acuerdo a lo observado en campo son parcelas de maíz en su primera etapa de sembrío (plantas relativamente pequeñas) y otras áreas como praderas o terrenos en descanso. Le corresponde a este grupo el 15.54% del total de área del centro poblado Mayhuasi.

4.3.3. Vegetación abundante y vigorosa (NDVI 0.4 -0.7)

De acuerdo a lo observado en campo son parcelas de maíz que se encuentran pasando la primera etapa des sembrío y otras áreas como praderas con vegetación más densa u otro tipo de cultivo como la alfalfa. Le corresponde a este grupo el 65.29% del total de área del centro poblado Mayhuasi.

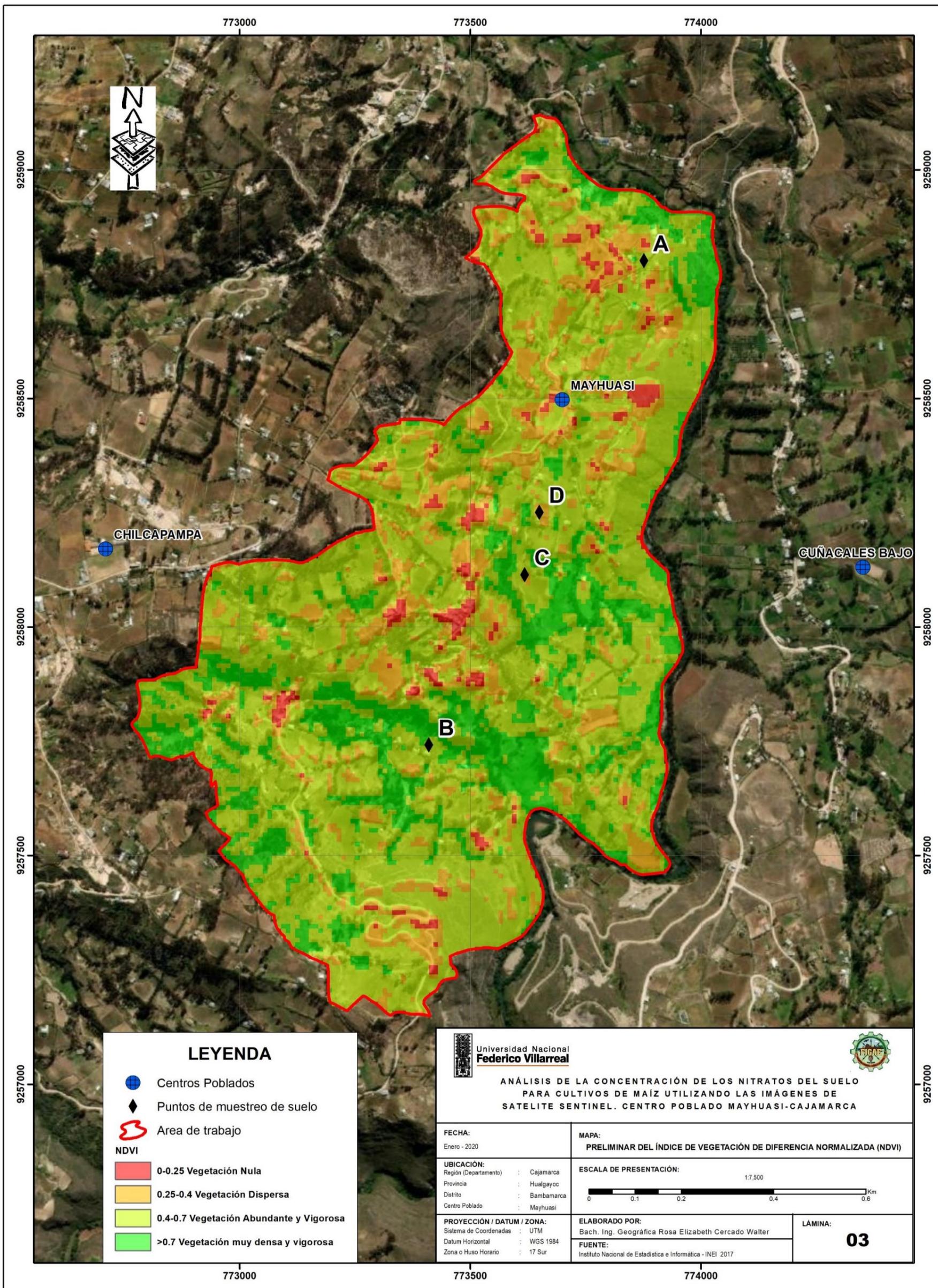
4.3.4. Vegetación muy densa y vigorosa (NDVI >0.7)

Las áreas con vegetación muy densa y vigorosa, de acuerdo a lo observado en campo corresponden a arbustos que en algunos casos se encuentran bordeando las parcelas de maíz

(cercos), en otros casos corresponde a parcelas que no cuentan con sembríos pero que tienen abundante vegetación y en especial arbustos. Le corresponde a este grupo el 16.72% del total de área del centro poblado Mayhuasi.

Figura 31

Mapa preliminar del NDVI



4.4. Elaboración de un modelo matemático que permita determinar la concentración de nitratos depositados en el suelo y los cultivos de maíz en el centro poblado Mayhuasi

El modelo matemático permite cuantificar la concentración de nitratos a mayor escala para todas las parcelas de maíz del centro poblado Mayhuasi. El análisis geoestadístico muestra que las variables NDVI de la imagen satelital y los nitratos depositados en el suelo se encuentran muy relacionadas (análisis de correlación).

Una vez demostrado el relacionamiento de las variables se obtuvo los modelos matemáticos para los dos estratos de profundidad del suelo.

4.4.1. Modelo 1

Este modelo fue construido en base a la capa del NDVI de la imagen satelital y la regresión polinómica es la que más se aproxima a la representación de las variables; cuenta con una significancia de 0.04 el cual es menor al 0.05 (valor máximo permitido), y con un nivel de confianza del 99% es el modelo elegido para representar la capa de nitratos del suelo para la profundidad de 0-30 cm del suelo en los cultivos de maíz en el poblado de Mayhuasi.

4.4.2. Modelo 2

Este modelo fue construido en base a la capa del NDVI de la imagen satelital y la regresión polinómica es la que más se aproxima a la representación de las variables; cuenta con un nivel de confianza del 89% y pese a que es un porcentaje alto se descarta pues el nivel de significancia de 0.18 es mayor al 0.05 (valor máximo permitido) es por ello que el modelo 2 no fue aplicado por que estadísticamente no es significativo; cabe indicar que la profundidad a la que fueron tomadas la muestras es de 30-60 cm del suelo.

Con el modelo 1 se calcularon los nuevos valores para la concentración de nitratos en todas las parcelas de maíz del centro poblado Mayhuasi.

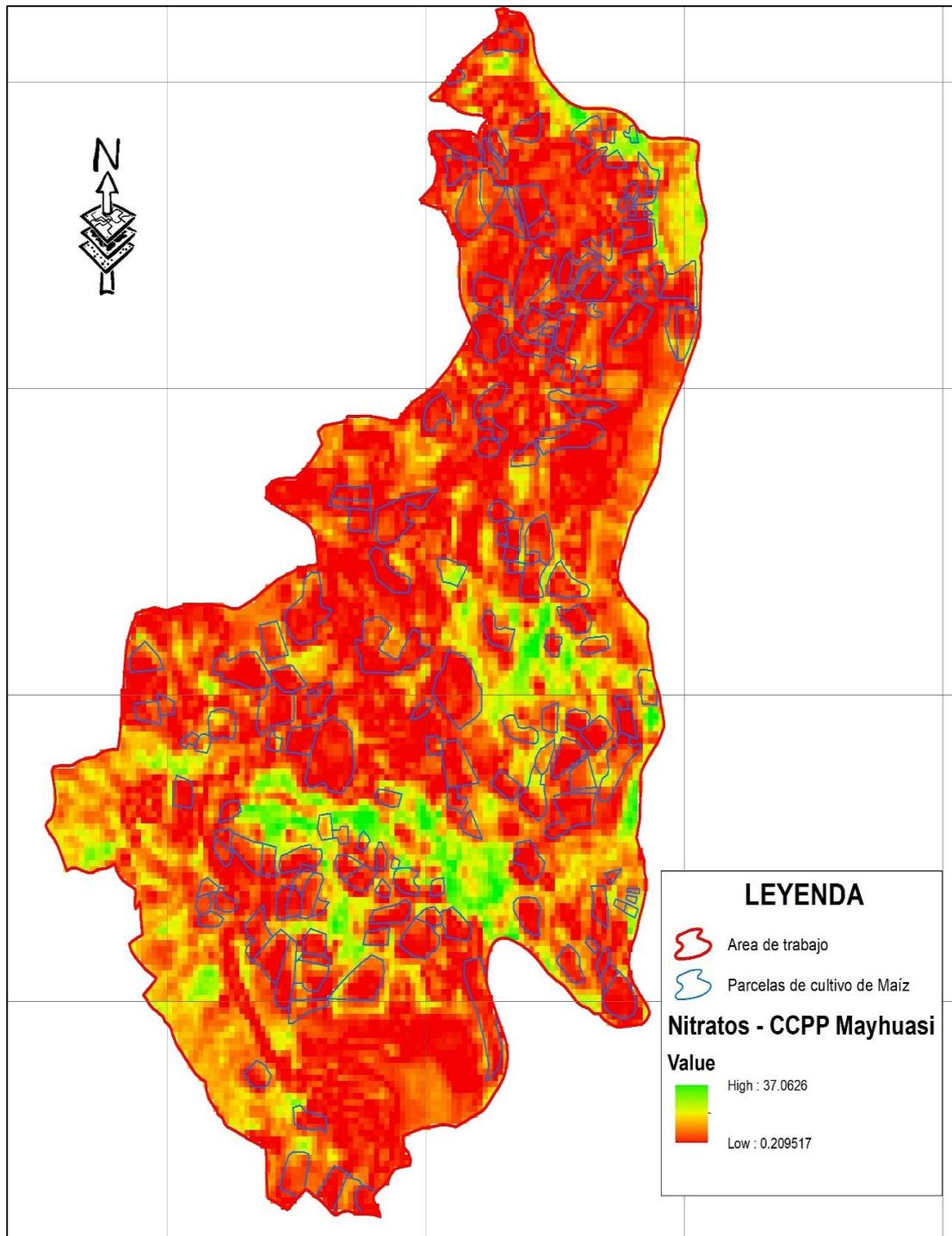
Tabla 17*Modelos matemáticos que determinan la concentración de nitratos*

N°	Modelos definidos	Profundidad (cm)	Significancia	R²
1	Nitratos = $124.54 (\text{NDVI})^2 - 100.6 (\text{NDVI}) + 20.525$	0-30	0.04	0.99
2	Nitratos = $49.031(\text{NDVI})^2 - 41.547(\text{NDVI}) + 9.494$	30-60	0.18	0.89

Nota. Los modelos matemáticos se obtuvieron en la etapa de análisis de datos al realizar la regresión matemática.

Figura 32

Concentración de nitratos en el suelo para el centro poblado Mayhuasi



Nota. el ráster de concentración de nitratos en el suelo se visualiza en tonalidades rojas y verdes, siendo las de color rojo zonas con escasa concentración de nitratos.

Luego de haber obtenido los nitratos para todo el centro poblado Mayhuasi se extrae una nueva imagen exclusivamente para las parcelas de maíz (173 en total), y así obtener el resultado final. (ver Figura 34).

Tabla 18

Concentración de nitratos usando el modelo ajustado

Punto	Subpunto (0-30 cm)	NDVI	NO₃	NO₃ recalculado
A	A1	0.54	2.50	2.50
B	B1	0.57	3.80	3.80
C	C1	0.33	0.89	0.88
D	D1	0.33	0.90	0.91

Nota. Para los cuatro puntos de muestreo se visualiza los nitratos recalculados.

Las concentraciones de nitratos para las parcelas de maíz varían entre los 0.21 ppm a 31.36 ppm, estos valores fueron reclasificados en 4 clases para así realizar un análisis más detallado.

- **Clase 1 (< 5 ppm):** Esta clase muestra una muy baja cantidad de Nitratos en el suelo, es un estado crítico de la planta. En la etapa de campo se pudo observar plantas de maíz con hojas amarillentas el cual es una muestra de que el cultivo no cuenta con la cantidad suficiente de nitratos, es por ello que en esta etapa del cultivo se debe realizar una fertilización nitrogenada inmediata.
- **Clase 2 (5-10 ppm):** Esta clase establece una baja cantidad de Nitratos en el suelo, estos cultivos también necesitaran de una fertilización de nitratos que permitan tener plantas más vigorosas aprovechando que en la etapa de la toma de muestras, las plantas aún estaban empezando un crecimiento acelerado hasta llegar a la floración.
- **Clase 3 (10-20 ppm):** Esta clase establece una cantidad intermedia de Nitratos en el suelo, generalmente en esta clase se evidencia áreas pequeñas de las parcelas de maíz y aquellas que cubren más de la mitad de la parcela están cercanas a fuentes de agua

a excepción de una única parcela que según indica el dueño fue usado en años anteriores como acopio de residuos sólidos de la ciudad de Bambamarca. (Ver Figura 32).

- **Clase 4 (>20 ppm):** Esta clase establece una cantidad alta de Nitratos en el suelo, se presenta en áreas pequeñas de las parcelas de maíz, generalmente cercanas a cursos de agua y a los cercos de las parcelas, según el NDVI estudiado es de 0.4 - 0.7 ppm que corresponde a una vegetación moderada.

Tabla 19

Concentración de nitratos por clases y áreas que representan

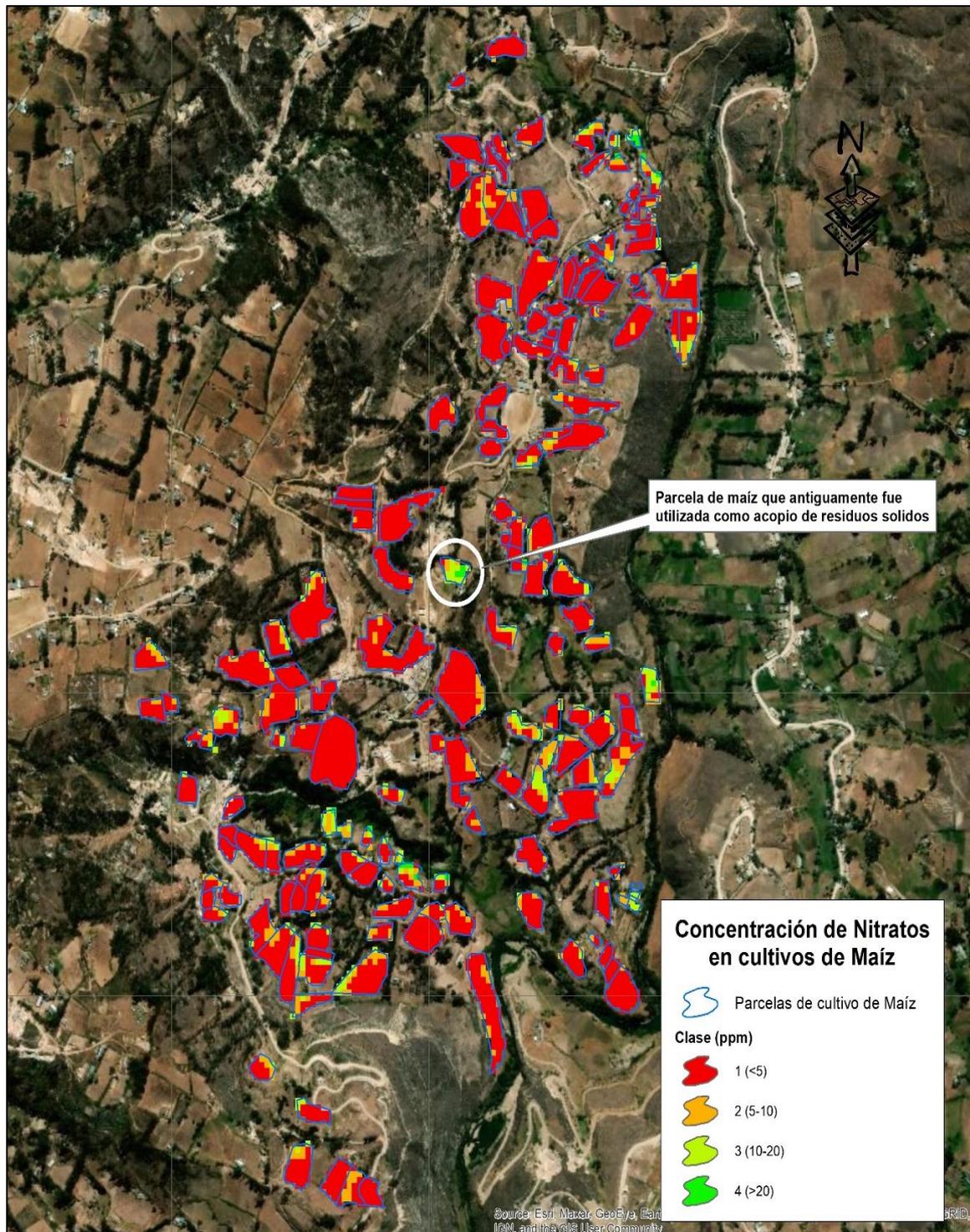
Clase	Concentración NH₃ (ppm)	Área (ha)	%
1	< 5	24.37	81.59
2	5-10	3.68	12.32
3	10-15	1.66	5.56
4	15-20	0.16	0.54
Total, general		29.87	100.00

Nota. La reclasificación se dio en base a cuatro intervalos, los mismos que facilitaron el análisis.

Se determinó que la clase 1 (<5 ppm) representa el 81.59% es la mas baja para cultivos de maiz y a la vez la mas representativa en nuestra area de estudio; la clases 4 (0.54 ppm) cuenta con un porcentaje minimo y no significativo del 0.54% del area total de las parcelas de cultivo de maiz, estas areas representan plantaciones con hojas mas vigorosas y con suelos mejor nutridos.

Figura 33

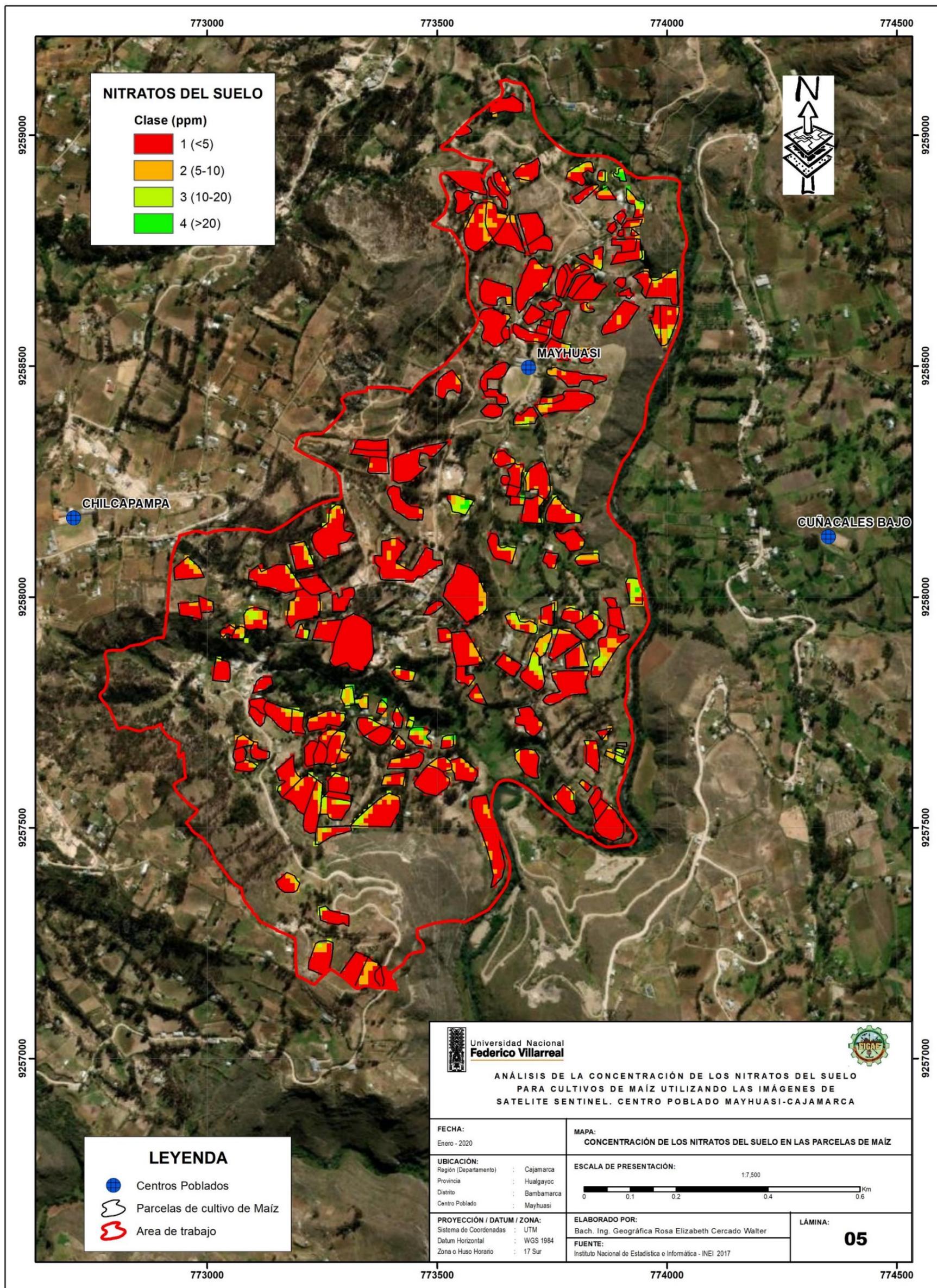
Parcela de maíz con mayor concentración de nitratos



Nota. Se detectó que el centro poblado existe una parcela con mayor concentración de nitratos, dentro de un área con tendencia a una baja concentración.

Figura 34

Mapa de concentración de los nitratos del suelo en las parcelas de maíz



V. Discusión de resultados

A partir de los hallazgos encontrados aceptamos la hipótesis alternativa general que establece que la concentración de los nitratos del suelo en cultivos de maíz en el centro poblado Mayhuasi se puede determinar mediante el empleo de un modelo matemático en el que utilicen los resultados de laboratorio del análisis de la concentración de nitratos del suelo y el NDVI de la imagen satelital Sentinel del 12 de enero del 2019.

Estos resultados guardan relación con lo que sostienen Sánchez (2018) y Manzano y Oña (2018), quienes señalan que la concentración de los nitratos del suelo se puede determinar mediante el empleo de modelos matemáticos, sugiriendo así que esta metodología sea usada como herramienta de solución pues requiere de menor coste y además se puede detectar zonas con problemas de concentración de nitratos. Esto es acorde con lo que en este estudio se halla.

Respecto al trabajo de campo, en este estudio se puede decir que es primordial para la identificación y cuantificación de las parcelas con cultivos de maíz. Cuanto más detallado es el trabajo de campo, más exactitud se obtienen en los resultados.

La metodología empleada requiere de los datos resultantes del análisis de las muestras de suelo, para obtener la concentración de nitratos en puntos específicos de parcelas representativas; en esto concuerdan con Duggan (2017) y Linarez et al. (2020) quienes sostienen que el análisis de suelos es una herramienta fundamental para evaluar la fertilidad del suelo, su capacidad productiva y es la base para definir la dosis de nutrientes a aplicar. Para que el dato analítico reportado por el laboratorio sea útil, es imprescindible realizar un adecuado muestreo de suelos, ya que en esta etapa es donde se define la exactitud de los resultados del análisis de suelos.

En el presente estudio el NDVI se obtiene del procesamiento de la imagen del satélite, específicamente con las bandas del Rojo e Infrarrojo cercano y en base a los resultados se

realiza un diagnóstico preliminar de la salud de la vegetación, esto se corrobora con Badin et al. (2017) quienes señalan que el NDVI fue una variable clasificatoria significativa para explicar el rendimiento y la respuesta a la refertilización nitrogenada de maíz; Argote (2018) también menciona que el NDVI permite representar las variables agronómicas del cultivo pues fue de las que mejor se correlaciona con la estimación de rendimiento de mazorca y de rendimiento de forraje verde que estaría directamente relacionado con la concentración de nitratos del suelo.

La elaboración de un modelo matemático que permita determinar la concentración de los nitratos depositados en el suelo y los cultivos de maíz en el centro poblado de Mayhuasi, es una técnica muy acertada y concuerda con Manzano, Oña et al. (2018), quienes incluso sugieren que las caracterizaciones del suelo mediante el análisis de muestras mediante métodos convencionales de laboratorio no se pueden eliminar por completo pues permiten la elaboración de modelos que luego se aplican en áreas más grandes.

VI. Conclusiones

- En esta tesis se determinó la concentración de los nitratos del suelo para cultivos de maíz en el centro poblado de Mayhuasi, distrito de Bambamarca, provincia de Hualgayoc – Cajamarca. El centro poblado Mayhuasi, muestra estratos de profundidad con diferentes concentraciones de nitratos del suelo que son obtenidos mediante el empleo de un modelo matemático que utiliza datos de los resultados de laboratorio del análisis de la concentración de nitratos del suelo en puntos específicos de suelos y el NDVI de la imagen satelital.
- Se identificó y cuantificó las parcelas con cultivos de maíz en el poblado Mayhuasi. La reclasificación de la imagen satelital permitió identificar las posibles parcelas de maíz, pero con el trabajo de campo se complementó y se validó la información, esto nos permitió identificar espacialmente a 173 parcelas en nuestra área de estudio.
- Se determinó la concentración de nitratos en el suelo en puntos específicos de parcelas representativas. La toma de muestras de suelo fue fundamental, pues al ser llevadas al laboratorio permitió la obtención de la concentración de nitratos, los mismos que posteriormente fueron replicados con la ayuda del modelo matemático a todas las parcelas del centro poblado Mayhuasi.
- Se elaboró un diagnóstico comparativo preliminar del NDVI utilizando imágenes de satélite Sentinel. El 65.29% del área total del centro poblado Mayhuasi presenta una vegetación abundante y vigorosa, mientras que un 2.44% representa áreas sin vegetación. Los cultivos de maíz presentan en su mayoría vegetación dispersa (15.54%), mientras que solo un 16.72% representa áreas con vegetación muy densa y vigorosa que corresponde áreas con presencia de arbustos que en algunos casos se encuentran bordeando las parcelas de maíz (cercos).
- Se elaboró un modelo matemático que permite determinar la concentración de los

nitratos depositados en el suelo para las parcelas con cultivos de maíz en el centro poblado de Mayhuasi. Este modelo puede determinar zonas que presenten problemas de concentración de nitratos, hasta un 99.99% de nivel de confianza y una significancia de 0.04 (Modelo 1, que emplea el NDVI, el mismo que es un buen indicador de los niveles de nitratos para el estrato de 0-30 cm de profundidad del suelo cultivado con Maíz. Esta metodología permite ahorrar recursos y tiempo pues al incorporar la toma de muestras de suelo solo en puntos estratégicos de acuerdo a zonas homogéneas y luego replicarlos mediante el uso del modelo matemático que incorpora el NDVI, permite realizar un mapeo automatizado de la concentración de nitratos en todas las parcelas del centro poblado, evitando así la toma de muestras de suelo por cada parcela y además de ello permitirá realizar un control permanente si fuese necesario puesto que se cuenta con imágenes satelitales actualizadas que se pueden usar de ser necesario.

VII. Recomendaciones

- La concentración de los nitratos en el suelo es un factor muy importante a considerar en la evaluación del crecimiento del maíz, influye también en la calidad de la cosecha, es por ello que se recomienda un monitoreo constante utilizando tecnología satelital que abarca una mayor extensión y tiene menor costo. De la misma manera se recomienda hacer un monitoreo constante para otro tipo de cultivos.
- Para identificar y cuantificar las parcelas de maíz siempre será necesario realizar una evaluación preliminar de la imagen satelital, para ello se den utilizar las herramientas de los sistemas de información geográfica que nos permiten identificar parcelas u áreas con características similares, datos que se usan de guía en el trabajo de campo y facilitan la toma de datos.
- Se debe determinar en trabajos de gabinete la ubicación más propicia de los puntos de muestreo de suelo y tenerlos identificados mediante coordenadas geográficas. En la visita a campo previa a la toma de muestras se debe comprobar la accesibilidad y las rutas propicias, al mismo tiempo que será necesario solicitar del apoyo de un comunero para que pueda ser la guía durante el recorrido. Las tomas de muestra de suelos deben realizarse de acuerdo a la normativa establecida por el MINAN y llevadas inmediatamente a un laboratorio de suelos para su posterior análisis y obtención de resultados.
- Continuar aplicando el NDVI obtenido del procesamiento de las imágenes de satélite Sentinel en el análisis de la concentración de los nitratos del suelo en cultivos de maíz, puesto que se ha demostrado su alto grado de relación entre ambas variables, facilitando su estudio al generar diagnósticos a mayor escala y en tiempo real de las parcelas. Para realizar un mejor análisis es primordial elaborar un diagnóstico preliminar y así clasificar la capa NDVI de tal manera que los valores más cercanos

a 1 reflejen áreas con abundante vegetación y los valores de -1 a 0 indiquen áreas con vegetación nula u objetos inanimados.

- El empleo de los modelos matemáticos debe utilizarse en los estudios de la concentración de nitratos en cultivos de maíz previo análisis de datos que demuestre un alto grado de correlación estadística.

VIII. Referencias

- Abreu, J. (2012). Hipótesis, método y diseño de investigación. Daena: *International Journal of Good Conscience*, 7(2), 187-197. [http://www.spentamexico.org/v7-n2/7\(2\)187-197.pdf](http://www.spentamexico.org/v7-n2/7(2)187-197.pdf)
- Antón, A., Lizaso, J. (2001). Nitritos, nitratos y nitrosaminas. Fundación Ibérica para la Seguridad Alimentaria. *España*. 13181019_nitritos_nitratos-with-cover-page-v2.pdf
- Arévalo, G. E. y M. Sánchez (2014). *Métodos Analíticos del Laboratorio de Suelos de Zamorano*. Documento Interno de trabajo. Zamorano, Honduras. <https://doi.org/10.5377/ceiba.v52i1.1129>
- Argote Mamani, M. A. (2018). *Análisis espacio-temporal del vigor y área foliar de maíz forrajero (Zea mays l.) cv. Inia 617-Chuska con tres dosis de nitrógeno mediante imágenes infrarrojas Aerotransportadas*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/7231>
- Badin Vidal, C. J., Bonomo Franco, J. J., & Sosa Barolín, L. (2017). *Evaluación del uso de sensores remotos para predecir el potencial de rendimiento y la respuesta a la refertilización nitrogenada de maíz*. [Tesis de pregrado, Universidad de la Republica, Uruguay]. https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/18612/1/TTS_Badin%20VidalCarlosJavier.pdf
- Basterra (2011). *Teledetección – Imágenes satelitales – Procesamiento digital de imágenes*. <http://ing.unne.edu.ar/dep/goeciencias/fotointer/pub/teoria2011/parte02/tdi.pdf>
- Camacho, J. (2013). *Uso de la reflectancia difusa - NIR en la determinación de características físicas y químicas de un Oxisol. Carimagua - Meta*. [Tesis de posgrado, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/20889>

Consultoría Estratégica de Investigación de Mercados [CIMEC]. (2021)

<https://www.cimec.es/coeficiente-correlacion-pearson/#:~:text=El%20coeficiente%20de%20correlaci%C3%B3n%20de%20Pearson%20oscila%20entre%20%20E2%80%931%20y,est%C3%A1n%20asociadas%20en%20sentido%20inverso.&text=Finalmente%20una%20correlaci%C3%B3n%20de%20lineal%20entre%20las%20dos%20variables.>

Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial [CONIDA]. (2011, 1 enero).

Procesamiento digital de imágenes de satélite.
<http://www.conida.gob.pe/index.php/pdf/Capacitacion/procesamiento-digital-de-imagenes-satelitales.pdf>.

Chuvieco Salinero, E. (2008). *Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio* (3.^a edición). Editorial Ariel. S.A.

[https://books.google.com.pe/books?id=aKsNXCVCtcQC&printsec=frontcover&dq=Chuvieco+Salinero,+E.+\(2008\).+Teledetecci%C3%B3n+ambiental:+La+observaci%C3%B3n+de+la+tierra+desde+el+espacio+\(No.+528.8+CHU\).&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiU7pnEjarxAhWxLLkGHQbTCN4Q6AEwAnoECAYQAg#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pe/books?id=aKsNXCVCtcQC&printsec=frontcover&dq=Chuvieco+Salinero,+E.+(2008).+Teledetecci%C3%B3n+ambiental:+La+observaci%C3%B3n+de+la+tierra+desde+el+espacio+(No.+528.8+CHU).&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiU7pnEjarxAhWxLLkGHQbTCN4Q6AEwAnoECAYQAg#v=onepage&q&f=false)

Duggan, M. T. (2017). *Análisis de suelos: una herramienta clave para el diagnóstico de fertilidad de suelos y la fertilización de cultivos.* Madrid Blogs. Volumen (s/n)

<https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2010/08/13/136733> ESA. (2015). European Spatial Agency.

https://www.esa.int/ESA_in_your_country/Spain/Las_misiones_Sentinel

Formagio & Del' Arco (2017). *Sensoriamento remoto em Agricultura.*

<https://www.ofitexto.com.br/livro/sensoriamento-remoto-em-agricultura/>

García, F. O., Daverede, I. C. (2008). *Diagnóstico para recomendación de fertilización nitrogenada en cultivos de interés agronómico. In XI Congreso Ecuatoriano de la*

Ciencia del Suelo. Volumen (s/n), 28. <http://www.secsuelo.org/wp-content/uploads/2015/06/12.-Dr.-Fernando-Garcia.pdf>

Girón, Y. (2009). *Análisis multiescalar de reflectancia de los suelos salinos en el ex lago de Texacoco*. [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma de México].

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952009000400007

Gutiérrez, C. P., & Nieto, Á. L. M. (2006). *Teledetección: nociones y aplicaciones*. Carlos Pérez.

[https://books.google.com.pe/books?id=SfrGxbO1DT0C&printsec=frontcover&dq=Guti%C3%A9rrez,+C.+P.,+%26+Nieto,+%C3%81.+L.+M.+\(2006\).&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwj10qmVj6rxAhUepZUCHWJfA_oQ6AEwAHoECAIQAg#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pe/books?id=SfrGxbO1DT0C&printsec=frontcover&dq=Guti%C3%A9rrez,+C.+P.,+%26+Nieto,+%C3%81.+L.+M.+(2006).&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwj10qmVj6rxAhUepZUCHWJfA_oQ6AEwAHoECAIQAg#v=onepage&q&f=false)

Hernández, H. J., & Montaner, D. (2009). *Patrones de respuesta espectral. Tecnologías Geoespaciales: Experiencias Aplicadas al Estudio y Gestión del Territorio*. Carlos Mena (Ed.) ISBN, 978-956.

<https://www.ridaa.unicen.edu.ar/xmlui/bitstream/handle/123456789/1354/Trabajo%20Final%20Passucci%20V.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi [GAC]. (2006). *Métodos analíticos de laboratorio de suelos*. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) Volumen (s/n).

<https://www.igac.gov.co/es/catalogo/metodos-analiticos-del-laboratorio-de-suelos>

Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI]. (2017). *Resultados censales*.

<http://censos.inei.gob.pe/Cenagro/redatam/>

INTAGRI S.C. (2020) *La conductividad eléctrica del suelo*.

<https://www.intagri.com/articulos/suelos/la-conductividad-electrica-del-suelo-en-el-desarrollo-de-los-cultivos>.

Isla Climente, R., Quílez y Sáez de Viteri, D., Valentín, F., Casterad Seral, M. A., Aibar Lete, J., & Maturano, M. (2011). *Utilización de imágenes aéreas multiespectrales para evaluar la disponibilidad de nitrógeno en maíz.*

<https://www.researchgate.net/profile/Dolores->

[Quilez/publication/268406748_Utilizacion_de_imagenes_aereas_multiespectrales_para_evaluar_la_disponibilidad_de_nitrogeno_en_maiz/links/54b90aae0cf28faced6267aa/Utilizacion-de-imagenes-aereas-multiespectrales-para-evaluar-la-disponibilidad-de-nitrogeno-en-maiz.pdf](https://www.researchgate.net/publication/268406748_Utilizacion_de_imagenes_aereas_multiespectrales_para_evaluar_la_disponibilidad_de_nitrogeno_en_maiz/links/54b90aae0cf28faced6267aa/Utilizacion-de-imagenes-aereas-multiespectrales-para-evaluar-la-disponibilidad-de-nitrogeno-en-maiz.pdf)

Jackson, R. D. (1983). Spectral indices in n-space. *Remote sensing of environment*, 13(5), 409-421. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/003442578390010X>

Laguna, C. (2014). *Correlación y regresión lineal*. <http://www.icsaragon.com/cursos/salud-publica/2014/pdf/M2T04.pdf>.

Linarez, K. A., Coaquira, I. C., & Bernedo, L. R. (2020). *Quality of Agricultural Soils in the Interior Bay of Puno, Peru–2018*. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 29(2). <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v29n2/2071-0054-rcta-29-02-42.pdf>

Lira, J. (2003). *La percepción remota: nuestros ojos desde el espacio* (3ra ed.; p. 151). México: Fondo de Cultura Económica. ISBN: 968-166922-3.

https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/39002337/63_LA_PERCEPCION_REMOTA_NUESTROS_OJOS_EN_EL_ESPACIO.pdf?1443996628=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3D63_LA_PERCEPCION_REMOTA_NUESTROS_OJOS_EN.pdf&Expires=1624338685&Signature=P6GZ89on8jBacmJCMHOa8y7yGP-

[PjBBrUyRMnfchWiauas3V9aQjNBmJCLQQEUVBUreOIVJystKy4BQflxLucUGXzvpI8CBMF2IdHZchAmNR8u82QoVZslMc0vsjpoLbzjdvhBnp26Ccef6WtLe8XCDsQOhK0C14QtG8q38uLAC8bMOM1q3jSmUIrF3yKCLl0Ps12CvjFFhFkspHZzpLQ~upeis](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/39002337/63_LA_PERCEPCION_REMOTA_NUESTROS_OJOS_EN_EL_ESPACIO.pdf?1443996628=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3D63_LA_PERCEPCION_REMOTA_NUESTROS_OJOS_EN.pdf&Expires=1624338685&Signature=P6GZ89on8jBacmJCMHOa8y7yGP-PjBBrUyRMnfchWiauas3V9aQjNBmJCLQQEUVBUreOIVJystKy4BQflxLucUGXzvpI8CBMF2IdHZchAmNR8u82QoVZslMc0vsjpoLbzjdvhBnp26Ccef6WtLe8XCDsQOhK0C14QtG8q38uLAC8bMOM1q3jSmUIrF3yKCLl0Ps12CvjFFhFkspHZzpLQ~upeis)

dZStZe0bBgEjmqN91sjIx332s2pqbEh5B56U7diAlSEC7e2zfSL7OrzKs3rAiyOJIshBd
 keb1uamhvRIAMHMQLp9z~tymxyZjtQOwaEsnpIanmHIC1OhMT71g__&Key-Pair-
 Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

Lizcano, R. (2017). *Muestreo de suelos, técnicas de laboratorio e interpretación de análisis de suelos*, Ed. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Ecuador.
https://www.researchgate.net/publication/323823646_Muestreo_de_Suelos_Tecnicas_de_Laboratorio_e_Interpretacion_de_Analisis_de_Suelos

López, A. J. (2005). *Manual de edafología. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química. Agrícola de la Universidad de Sevilla*.
<http://files.infoagroconstanza.webnode.es/200000017-c2dccc3d62/edafologia%20del%20suelo.pdf>

Lusia, A. Estimación de rendimiento de cultivo con datos de satélite Estimation of crop yield from remote sensing data (2017). *Enfoques Interdisciplinarios para la Sustentabilidad del Ambiente*, 588. https://www.researchgate.net/profile/Maria-Dos-SantosAfonso/publication/287205151_Enfoques_Interdisciplinarios_para_la_Sustentabilidad_Ambiental/links/56730a8e08aee7a427436c5a/Enfoques-Interdisciplinarios-para-la-Sustentabilidad-Ambiental.pdf#page=588

Machuca, J. (2015). *Interpretación de Vegetación, Suelo y Agua. Argentina: Universidad Nacional de Nordeste*.
<http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/15265/T-ESPE-040525.pdf?sequence=1&isAllowed=>

Manzano Lamar, D. A., & Oña Hidalgo, D. L. (2018). *Análisis de la espectroscopia de reflectancia para la determinación de las propiedades químicas de suelos agrícolas en la parroquia de Lloa (Bachelor's)* [Tesis de pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE]

- MasterGIS (2019) *Características de los satélites Sentinel*.
<https://www.mastergis.com/caracteristicas-sentinel/>.
- Melesio-Nolasco, S. (1991). *Bases teóricas de la percepción remota. Estudios de recursos naturales renovables*. II Coloquio sobre Sensores Remotos. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.
<https://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea65s/ch09.htm>
- Novales, A. (2010). *Análisis de regresión*. Universidad Complutense de Madrid.
<https://www.ucm.es/data/cont/docs/518-2013-11-13-Analisis de Regresion.pdf>
- Ordiales, R. (2007). *Prontuario de la Radiación Electromagnética*. EEZA, 44.
<http://digital.csic.es/handle/10261/12715>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], L. F. (2004). *Estimaciones globales de las emisiones gaseosas de NH₃, NO y N₂O provenientes de las tierras agrícolas*. <http://www.fao.org/3/y2780s/y2780s.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2020) *Definiciones*. <http://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2020) *Clasificación de suelos*. <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>.
- Osorio, N. W. (2012). *PH del Suelo y Disponibilidad de Nutrientes*. *Revista Manejo integral del suelo y Nutrición Vegetal*, 1(4).
<https://www.bioedafologia.com/sites/default/files/documentos/pdf/pH-del-suelo-y-nutrientes.pdf>
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). *Propiedades físicas del suelo*. <http://bibliofagro.pbworks.com/f/propiedades+fisicas+del+suelo.pdf>

- Salinero, J. G. (2004). *Estudios descriptivos*. 7.
<http://webpersonal.uma.es/de/jmpaez/websci/BLOQUEIII/DocbIII/Estudios%20descriptivos.pdf>
- Sánchez Mora, K. M. (2018). *Diseño de un estimador no lineal para predecir el nivel de nitrógeno en suelo agrícola*.
https://repositorio.ucsp.edu.pe/bitstream/UCSP/15668/1/SANCHEZ_MORA_KAT_EST.pdf
- Sarría, F., & Palazón, J. (2008). *Fundamentos de Teledetección*. [Tesis de pregrado, Universidad de las fuerzas armadas].
[ESPEhttp://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/15265/T-ESPE-040525.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/15265/T-ESPE-040525.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Sobrino, J. A. (2001). *Teledetección* (1 edición). Editorial Sobrino.
https://books.google.com.ec/books?id=Yb6xIldfoT0C&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Suárez Ibujés, M. O. (2011). *Coeficiente de correlación de Karl Pearson*.
<http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/766>
- Torres, R. A. C., Campillo, L. M. G., & López, H. M. D. (2015). *Percepción Remota: Elementos Básicos*. *Kuxulkab'*, 21(40).
<https://revistas.ujat.mx/index.php/kuxulkab/article/view/1001>
- Tristán, P., Wainschenker, R., & Doorn, J. H. (2008). *Normalización de imágenes satelitales en el análisis multi-temporal*. In *X Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/20582>
- Valerio, B., & Arturo, J. (1987). *Introducción a la estadística inferencial*. Editorial Universidad Estatal a Distancia. <https://editorial.uned.ac.cr/book/U00980>

- Vázquez, R. R., Pérez, E. V., Domínguez, S. T., & Reyes, F. G. (2002). *Utilización de imágenes de satélite para determinar áreas con problemas de lixiviación de nitratos*. *Revista Chapingo*. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 8(1), 31-37. https://www.redalyc.org/pdf/629/Resumenes/Resumen_62980103_1.pdf
- Vélez, J. P., Melchiori, R. J. M., Méndez, A., Villaroel, D., & Scaramuzza, F. (2012). *Fotografía aérea multiespectral para el diagnóstico de fertilización nitrogenada por sitio específico en maíz*. In *Congreso de Valor Agregado en Origen*. 1. Curso Internacional de Agricultura de Precisión. 11. Expo de Máquinas Precisas. 6. 2012 07 18-20, 18, 19 y 20 de julio de 2012. Manfredi, Córdoba. AR.
- Viera, M. A. D., & González, R. C. (2002). *Geoestadística aplicada*. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba: México DF, México, 31-57. https://www.academia.edu/23486534/Geoestadistica_Aplicada
- Zheng, G., Dongryeol, R. Y. U., Caixia, J., & Changqiao, H. O. N. G. (2016). *Estimation of organic matter content in coastal soil using reflectance spectroscopy*. *Pedosphere*, 26(1), 130-136. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1002016015600297>

IX. Anexos

Anexo A Solicitud de información para la Agencia agraria Hualgayoc

Lima, 12 de marzo del 2020

Señor
A quien corresponda
Director de la Agencia Agraria Hualgayoc - Bambamarca
Presente.-

De mi consideración,

Yo, Rosa Elizabeth Cercado Walter ciudadana peruana, con Documento Nacional de Identidad N° 72464399; Bach. Ing. Geográfica de la Universidad Nacional Federico Villarreal, con domicilio en: Ca. Marcona, MZ U10 Lote 12-Urb. Leoncio Prado-San Juan de Miraflores, me dirijo a usted para solicitar:

- **Información referida a la producción de maíz amiláceo blanco de las últimas 5 campañas agrícolas a nivel provincial y además Información relacionada a la producción agrícola en el sector estadístico del Frutillo.**

Esta solicitud se realiza con la finalidad de obtener información para mi proyecto de investigación (Tesis para optar por el Título Profesional en Ing. Geográfica) "concentración de los nitratos depositados en el suelo utilizando las imágenes de satélite Sentinel. Centro poblado Mayhuasi-Cajamarca"

Adjunto los siguientes documentos;

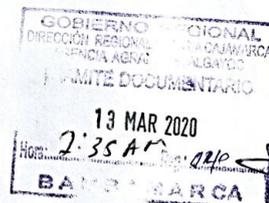
- Copia de DNI
- Copia de Grado académico (Bachiller)

Agradeciéndole su gentil atención y pronta respuesta, quedo de usted,

Atentamente,



Rosa Elizabeth Cercado Walter
Bach. Ing. Geográfica
Universidad Nacional Federico Villarreal
DNI: 72464399



Recibido/Bea/13/20
Hora 2:30 PM

Para: <i>María Cecilia</i>
Para: <i>Según P. B.</i>
Por: <i>Información</i>
Sol: <i>0.0000</i>
Cant: <i>02 de 02 de 20</i>
<i>[Signature]</i>

Anexo B Oficio de respuesta n° 68 – 2020 GR.CAJ-DRA/AAH-B



GOBIERNO REGIONAL CAJAMARCA
DIRECCION REGIONAL DE AGRICULTURA
AGENCIA AGRARIA HUALGAYOC - BAMBAMARCA



“Año de la Universalización de la Salud”

MAD: **5235517**

Bambamarca, 13 de Marzo del 2020

OFICIO N° 68 - 2020 - GR- CAJ-DRA/AAH-B

SEÑORA:

Bach. Rosa Elizabeth Cercado Walter
 Universidad Nacional Federico Villareal - Lima

ASUNTO:

Remite Información Solicitada

Referencia:

Solicitud de Fecha 12 de Marzo del 2020

Presente:

Es muy grato dirigirme a usted, para expresarle mi cordial saludo, y en relación al documento de referencia, hacer llegar adjunto al presente la información solicitada, sobre la producción de Maíz Amiláceo, Blanco de las últimas 05 campañas agrícolas del sector estadístico El Frutillo, de la provincia Hualgayoc – Bambamarca.

Es propicia la oportunidad para expresarle mi especial consideración y estima.

Atentamente.



GOBIERNO REGIONAL CAJAMARCA
 DIRECCION REGIONAL DE AGRICULTURA
 AGENCIA AGRARIA HUALGAYOC-BAMBAMARCA
 Ing. José Wilmar Sinosaka Chugden
 DIRECTOR

C.c. Archivo
 JWMCH/D.
 Hrvw/s.

Anexo C Producción agrícola de maíz amiláceo del sector estadístico Frutillo



GOBIERNO REGIONAL CAJAMARCA
DIRECCION REGIONAL AGRICULTURA CAJAMARCA
AGENCIA AGRARIA HUALGAYOC - BAMBAMARCA



PRODUCCION AGRICOLA DE MAIZ AMILACEO DEL SECTOR ESTADISTICO FRUTILLO

DISTRITO: BAMBAMARCA

PROVINCIA: HUALAYOC

CAMPAÑA	CULTIVO	HAS. SIEMBRADAS	KG/HA	T.M.
2015 - 2016	MAIZ AMILACEO	260	600	156000
2016 - 2017	MAIZ AMILACEO	260	600	156000
2017 - 2018	MAIZ AMILACEO	260	600	156000
2018 - 2019	MAIZ AMILACEO	255	600	153000
2019 - 2020	MAIZ AMILACEO	260	600	156000



NOTA: Cabe mencionar, que dicho sector estadístico, agrupa los caseríos de: Mayhuasi, Shihua, Apan bajo, Frutillo Bajo, Chilcapampa, Agomarca, Apan Bajo 28 de Julio, Lucma San Rafael y Arascorgue Vistalegre.


SEGUNDO SANTIAGO LOMBARDI BLANCO
RESP. ESTADISTICA AGRARIA H-B.

Anexo D Resultados de Laboratorio de las muestras de suelo



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

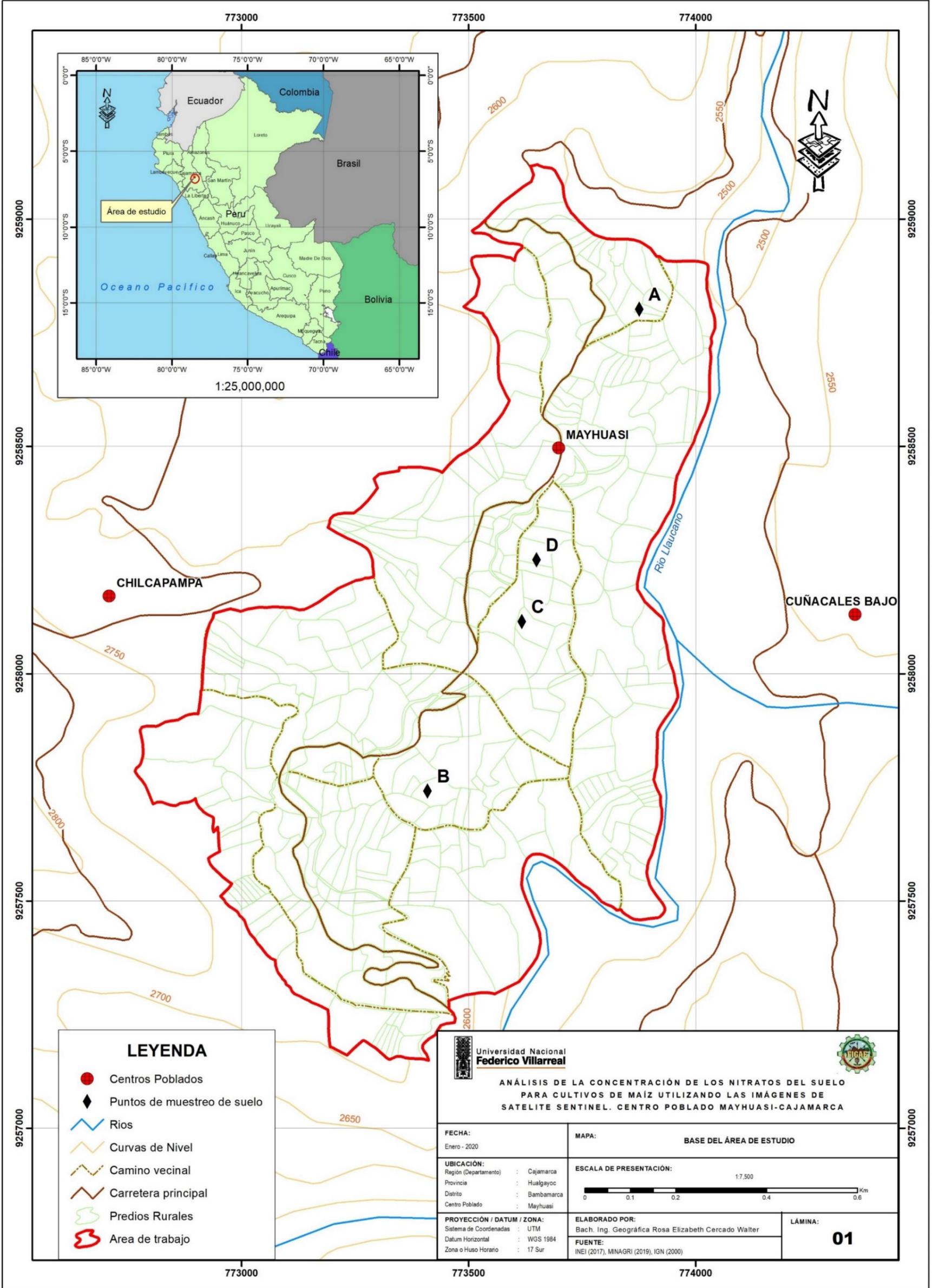
SOLICITANTE : ROSA ELIZABETH CERCADO WALTER
 PROCEDENCIA : CAJAMARCA/ HUALGAYOC/ BAMBAMARCA
 REFERENCIA : H.R. 66705
 BOLETA : 2448
 FECHA : 18/01/2019

Lab	Número Muestra		Nitrógeno nítrico ppm	Nitrógeno amoniacal ppm
	Claves			
041	A1		2.50	11.20
042	A2		1.36	11.20
043	B1		3.89	19.60
044	B2		1.79	19.60
045	C1		0.89	14.00
046	C2		0.98	19.60
047	D1		0.90	19.60
048	D2		1.27	16.80



Dr. Saúl García Bendezú
Jefe del Laboratorio

Anexo E Mapa base del área de estudio



Anexo F Mapa de ubicación del área de estudio

