



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica

Estimación de concentración de clorofila-a en humedales costeros mediante teledetección. Caso: Laguna Mayor de los Pantanos de Villa, Lima – Perú

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo

AUTORES

Jesús Miguel QUINTANA ORTIZ

Tania Rocío UZURIAGA GONZALES

ASESOR

Mg. Luis Alberto HUAMÁN AMASIFUEN

Lima, Perú

2023



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Quintana, J. & Uzuriaga, T. (2023). *Estimación de concentración de clorofila-a en humedales costeros mediante teledetección. Caso: Laguna Mayor de los Pantanos de Villa, Lima – Perú*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor 1	
Nombres y apellidos	Jesús Miguel Quintana Ortiz
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	72704660
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-3149-8548
Datos de autor 2	
Nombres y apellidos	Tania Rocío Uzuriaga Gonzales
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	70585020
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0002-1500-2562
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Luis Alberto Huamán Amasifuen
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	43322204
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-0834-3860
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Walter Aparicio Arévalo Gómez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09050786
Miembro del jurado 1	

Nombres y apellidos	Lía Elis Concepción Gamarra
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08645157
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	José Luis Quispe Vélchez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08119070
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.2.8. Ingeniería y tecnologías del Medio Ambiente
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Chorrillos Latitud: -12.207712 Longitud: -76.994277
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Marzo 2016 - Setiembre 2023
URL de disciplinas OCDE	Sensores remotos https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.04 Oceanografía, Hidrología, Recursos hídricos https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.11 Biología marina, Biología de agua dulce, Limnología https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.06.12



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓGRAFO

En el Salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el día viernes 22 de setiembre del año 2023, siendo las 18:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Dr. WALTER APARICIO ARÉVALO GÓMEZ
Ing. JOSÉ LUIS QUISPE VILCHEZ
Mg. LÍA ELIS CONCEPCIÓN GAMARRA

Presidente
Miembro
Miembro

Reunidos en Acto Académico Público de Sustentación de la Tesis titulada: «**ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA-A EN HUMEDALES COSTEROS MEDIANTE TELEDETECCIÓN. CASO: LAGUNA MAYOR DE LOS PANTANOS DE VILLA, LIMA - PERÚ**», Presentada por los Bachilleres **JESÚS MIGUEL QUINTANA ORTIZ Y TANIA ROCÍO UZURIAGA GONZALES**., para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo.

Expuesta la Tesis; los miembros del Jurado plantearon a los Bachilleres las preguntas pertinentes, que fueron absueltas a:

SATISFACCIÓN

Concluida la sustentación de Tesis, el Jurado procedió a evaluar y calificar la calidad y sustentación en secreto, cuyo calificativo fue: **DIECISIETE (17) APROBADO CON MENCIÓN HONROSA**

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓGRAFO, a Don **JESÚS MIGUEL QUINTANA ORTIZ Y TANIA ROCÍO UZURIAGA GONZALES**

Siendo las **19:10** horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (05) Actas Originales de la Sustentación de Tesis, firmadas por el Jurado Calificador.

Lima, 22 de setiembre del 2023

Dr. WALTER APARICIO ARÉVALO GÓMEZ
PRESIDENTE

Ing. JOSÉ LUIS QUISPE VILCHEZ
MIEMBRO

Mg. LÍA ELIS CONCEPCIÓN GAMARRA
MIEMBRO

Mg. LUIS ALBERTO HUAMÁN AMASIFUÉN
ASESOR DE TESIS



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA

INFORME DE ORIGINALIDAD

DIRECTOR DE LA ESCUELA PROFESIONAL INGENIERIA GEOGRÁFICA

Dr. Francisco Alejandro Alcántara Boza

OPERADOR DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES

Carla Marivi Ccora Huaman

DOCUMENTO EVALUADO:

Tesis para optar el Grado Académico de INGENIERA GEÓGRAFA titulado: «ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA-A EN HUMEDALES COSTEROS MEDIANTE TELEDETECCIÓN. CASO: LAGUNA MAYOR DE LOS PANTANOS DE VILLA, LIMA - PERÚ»

AUTOR DEL DOCUMENTO:

Bach. TANIA ROCÍO UZURIAGA GONZALES

FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO:

03/06/2022

FECHA DE APLICACIÓN DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES:

06/06/2022

SOFTWARE UTILIZADO

Turnitin

CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES

- Excluye textos entrecomillados
- Excluye fuentes para buscar similitud
- Excluye Bibliografía
- Excluye cadenas menores a 35 palabras

PORCENTAJE DE SIMILITUDES SEGÚN PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES

Nueve por ciento (09%)

FUENTES ORIGINALES DE LAS SIMILITUDES ENCONTRADAS

ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA-A EN HUMEDALES COSTEROS MEDIANTE TELEDETECCIÓN. CASO: LAGUNA MAYOR DE LOS PANTANOS DE VILLA, LIMA - PERÚ

INFORME DE ORIGINALIDAD

9%	9%	1%	4%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net	1%
2	cybertesis.unmsm.edu.pe	1%
3	repositorio.espe.edu.ec	1%
4	repositorio.ucm.edu.co:8080	1%
5	idoc.pub	1%
6	www.readbag.com	<1%
7	repositorio.unc.edu.pe	<1%
8	repositorio.upn.edu.pe	<1%

9	eprints.ucm.es	<1%
10	es.scribd.com	<1%
11	ig.conae.unc.edu.ar	<1%
12	repositorio.unsa.edu.pe	<1%
13	dspace.espoch.edu.ec	<1%
14	Submitted to Universidad San Francisco de Quito	<1%
15	issuu.com	<1%
16	repositorio.ucv.edu.pe	<1%
17	repositorio.unfv.edu.pe	<1%
18	renati.sunedu.gob.pe	<1%
19	ddd.uab.cat	<1%
20	roderic.uv.es	<1%



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA

Fuente de Internet	<1 %
21 docplayer.es Fuente de Internet	<1 %
22 Submitted to Universidad Santo Tomas Trabajo del estudiante	<1 %
Excluir citas Activo Excluir coincidencias < 40 words Excluir bibliografía Activo	

OBSERVACIONES

Ninguna

CALIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD

Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones

06/06/2022

Atentamente,



Firmado digitalmente por
ALCANTARA BOZA Francisco
Alejandro FAU 20148092282 hard
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 08.06.2022 21:45:52 -05:00

Dr. FRANCISCO ALEJANDRO ALCANTARA BOZA
DIRECTOR DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA(e)



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA

INFORME DE ORIGINALIDAD

DIRECTOR DE LA ESCUELA PROFESIONAL INGENIERIA GEOGRÁFICA

Dr. Francisco Alejandro Alcántara Boza

OPERADOR DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES

Carla Marivi Ccora Huaman

DOCUMENTO EVALUADO:

Tesis para optar el Grado Académico de INGENIERO GEÓGRAFO titulado: «ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA-A EN HUMEDALES COSTEROS MEDIANTE TELEDETECCIÓN. CASO: LAGUNA MAYOR DE LOS PANTANOS DE VILLA, LIMA - PERÚ»

AUTOR DEL DOCUMENTO:

Bach. JESÚS MIGUEL QUINTANA ORTIZ

FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO:

03/06/2022

FECHA DE APLICACIÓN DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES:

06/06/2022

SOFTWARE UTILIZADO

Turnitin

CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES

- Excluye textos entrecomillados
- Excluye fuentes para buscar similitud
- Excluye Bibliografía
- Excluye cadenas menores a 35 palabras

PORCENTAJE DE SIMILITUDES SEGÚN PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES

Nueve por ciento (09%)

FUENTES ORIGINALES DE LAS SIMILITUDES ENCONTRADAS

ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA-A EN HUMEDALES COSTEROS MEDIANTE TELEDETECCIÓN. CASO: LAGUNA MAYOR DE LOS PANTANOS DE VILLA, LIMA - PERÚ

INFORME DE ORIGINALIDAD

9%	9%	1%	4%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net	1%
2	cybertesis.unmsm.edu.pe	1%
3	repositorio.espe.edu.ec	1%
4	repositorio.ucm.edu.co:8080	1%
5	idoc.pub	1%
6	www.readbag.com	<1%
7	repositorio.unc.edu.pe	<1%
8	repositorio.upn.edu.pe	<1%

9	eprints.ucm.es	<1%
10	es.scribd.com	<1%
11	ig.conae.unc.edu.ar	<1%
12	repositorio.unsa.edu.pe	<1%
13	dspace.espoch.edu.ec	<1%
14	Submitted to Universidad San Francisco de Quito	<1%
15	issuu.com	<1%
16	repositorio.ucv.edu.pe	<1%
17	repositorio.unfv.edu.pe	<1%
18	renati.sunedu.gob.pe	<1%
19	ddd.uab.cat	<1%
20	roderic.uv.es	<1%



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA

Fuente de Internet		<1 %
21	docplayer.es Fuente de Internet	<1 %
22	Submitted to Universidad Santo Tomas Trabajo del estudiante	<1 %
Excluir citas Activo Excluir coincidencias < 40 words		
Excluir bibliografía Activo		

OBSERVACIONES

Ninguna

CALIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD

Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones

06/06/2022

Atentamente,



UNMSM

Firmado digitalmente por
ALCANTARA BOZA Francisco
Alejandro FAU 20148092282 hard
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 08.06.2022 21:45:25 -05:00

Dr. FRANCISCO ALEJANDRO ALCANTARA BOZA
DIRECTOR DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA(e)

DEDICATORIA

A mi pequeño Rafael quien es
mi motivo de vida

A mi madre Victoria Ortiz por su
apoyo en mis estudios y su
esfuerzo por hacerme mejor
persona cada día.

A la memoria de mi padre
Augusto Quintana por darme su
apoyo y enseñanzas durante mi
vida.

Jesús Miguel Quintana Ortiz

DEDICATORIA

A Dios, el dueño de todo y
porque siempre guía mi camino.

A mi hijo Rafael, mi mayor
felicidad y motivo de vida.

A mi amada madre Alcida
Gonzales por su apoyo en mis
estudios y su esfuerzo por
hacerme mejor persona cada día.

A mi querido padre Tito Uzuriaga
por darme su apoyo en cada
momento de mi vida.

Tania Rocio Uzuriaga Gonzales

AGRADECIMIENTOS

A nuestra querida Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Decana de América, nuestra alma mater.

Queremos agradecer a todas las personas que de alguna manera han hecho posible la realización de este trabajo.

A nuestro asesor de tesis el Ingeniero Luis Huamán Amasifuen, agradecerle la confianza y el apoyo durante el proceso de investigación, por compartir sus conocimientos y experiencia en el tema propuesto.

A nuestro querido profesor, el biólogo César Jorge Taboada por el gran apoyo que nos dio al iniciar nuestro tema de investigación y por sus grandes enseñanzas para nuestras vidas.

Al Ing. Jesús Ledesma Rivera y al Lic. Mario Polar del IMARPE (Instituto del Mar del Perú) por habernos brindado las instalaciones del Laboratorio de Hidroquímica y Productividad del IMARPE (Instituto del Mar del Perú) de manera desinteresada, para procesar la información obtenida en campo.

A la Dirección de Geomática de la Agencia Espacial del Perú - CONIDA por habernos brindado las imágenes satelitales y los equipos de cómputo, de manera especial al Dr. Rodolfo Moreno Santillán por su gran apoyo en nuestra investigación.

Al Lic. José Carlos Eche Llenque, docente del Grupo de Investigación Ciencias de la Tierra, Clima y Medio ambiente (CTCLIMA) de la Facultad de Ciencias Físicas de la UNMSM, por brindarnos las firmas espectrales de los Humedales de Villa.

A los señores responsables de los Humedales de Villa que nos permitieron investigar y nos concedieron el permiso para tomar muestras de agua de la laguna mayor.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.2.1. Descripción de la problemática	2
1.2.2. Formulación del problema	3
1.2.2.1. <i>Problema Principal</i>	3
1.2.2.2. <i>Problemas Específicos</i>	3
1.3. Objetivos de la Investigación	3
1.3.1. Objetivo principal	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.4. Importancia y alcance de la investigación	3
1.4.1. <i>Importancia teórica</i>	3
1.4.2. <i>Importancia práctica</i>	4
1.4.3. <i>Importancia social</i>	4
CAPÍTULO II	6
2. MARCO TEORICO	6
2.1. Antecedentes de investigación	6
2.2. Bases Teóricas	7
2.2.1. Teledetección	7
2.2.1.1. Definición	7
2.2.1.2. Imágenes satelitales	8
2.2.1.3. Correcciones de Imágenes Satelitales	10
2.2.1.4. Propiedades Ópticas Aparentes	11
2.2.1.5. Índices espectrales de agua	12
2.2.1.6. El espectro electromagnético	13
2.2.2. Concentración de Clorofila-a	14
2.2.2.1. Definición de concentración de Clorofila-a	14
2.2.2.2. Definición de humedales	14
2.2.2.3. Propiedades ópticas de la clorofila	15
2.2.2.4. Análisis para obtener la concentración de Clorofila-a	16
2.2.2.5. Espectrofotometría	17
2.2.2.6. Índice trófico	17

2.3. Definición de términos	18
CAPÍTULO III	21
3. HIPÓTESIS Y VARIABLES	21
3.1. Hipótesis	21
3.2. Variables	21
3.2.1. Variable independiente	21
3.2.2. Variable dependiente	21
3.3. Operacionalización de variables	21
3.4. Matriz de consistencia	22
CAPÍTULO IV	23
4. MATERIALES Y MÉTODOS	23
4.1. Área de Estudio	23
4.1.1. Tipo de Humedal	23
4.1.2. Características biofísicas	23
4.2. Diseño de Investigación	25
4.2.1. Tipo de investigación	26
4.2.2. Nivel de investigación	26
4.2.3. Enfoque de la investigación	26
4.3. Población y Muestra	27
4.3.1. Determinación de la concentración de Clorofila-a mediante análisis de laboratorio	28
4.3.1.1. Materiales	29
4.3.1.2. Recolección de datos	29
4.3.1.3. Metodología	30
4.3.1.4. Flujograma	31
4.3.2. Estimación de la Clorofila-a mediante teledetección	32
4.3.2.1. Materiales	32
4.3.2.2. Metodología	34
4.3.2.3. Preprocesamiento de las imágenes satelitales	35
4.3.2.4. Análisis de Firmas Espectrales	40
4.3.2.5. Delimitación de cuerpo de agua	40
4.3.2.6. Integración de datos	41
4.3.2.7. Correlación entre concentración de Clorofila-a e imágenes satelitales	41
4.3.2.8. Generación de mapas de concentración de clorofila	44

4.4. Análisis estadístico.....	45
CAPÍTULO V.....	47
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	47
5.1. Estimación de la Clorofila A por muestreo	47
5.1.1. Mediciones complementarias en los puntos de muestreo	47
5.1.2. Procedimiento Laboratorio.....	47
5.1.2.1. Toma de muestra.....	47
5.1.2.2. Almacenamiento y preservación	48
5.1.2.3. Análisis de laboratorio	49
5.1.2.4. Utilización del espectrofotómetro	50
5.1.3. Cálculos previos para la determinación de la Clorofila A	51
5.1.4. Resultados de Clorofila A	51
5.1.5. Estado trófico	52
5.2. Estimación de la Clorofila A mediante teledetección	53
5.2.1. Procesamiento de las imágenes satelitales	53
5.2.2. Delimitación de perímetro de cuerpo de agua	60
5.2.3. Correlación entre clorofila-A y datos satelitales.....	70
5.2.3.1. Selección de muestras para análisis de regresión	70
5.2.3.2. Análisis de firmas espectrales en imágenes de Reflectancia	71
5.2.3.3. Selección de modelos.....	76
5.2.4. Generación de mapas de concentración de clorofila	78
5.2.5. Mapas de estado trófico	82
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	86
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: ODS relacionados a esta investigación	5
Figura 2: Propiedades Ópticas Aparentes.....	11
Figura 3: Propiedades Ópticas Aparentes.....	12
Figura 4: Propiedades Ópticas Aparentes.....	12
Figura 5: Espectro electromagnético	13
Figura 6: Espectro de absorción de la Clorofila A.....	16
Figura 4: Niveles de concentración de nutrientes.....	19
Figura 11: Luz absorbida por la muestra en la celda	20
Figura 12: Vista satelital del área de estudio.....	24
Figura 13: Mapa de ubicación de la Reserva de Vida Silvestre los Pantanos de Villa	25
Figura 14: Mapa de puntos de muestreo Laguna Mayor de los Humedales de Villa	27
Figura 15: Comparativa de métodos espectrofotométricos más usados.	28
Figura 16: Curva Espectral de absorbancia	30
Figura 17: Flujograma de cálculos de laboratorio.	32
Figura 18: Diagrama de flujo de la metodología general	35
Figura 19: Flujo de trabajo de preprocesamiento.	36
Figura 20: Flujograma de Delimitación de cuerpo de agua.....	40
Figura 21: Flujo de trabajo para correlación.	42
Figura 22: Resultados Estado Trófico por muestreo de campo	53
Figura 23: Imagen Landsat DOS	55
Figura 24: Imagen SPOT TOA	56
Figura 25: Imagen SPOT DOS	57
Figura 26: Imagen SPOT con corrección ATCOR marítima	58
Figura 27: Imagen SPOT ATu	59
Figura 28: Índice MNDWI, Imagen Landsat DOS	60
Figura 29: Índice NDWI, Imagen Landsat DOS.....	61
Figura 30: Índice NDWI, Imagen SPOT TOA	61
Figura 31: Índice NDWI, Imagen SPOT ATm	62
Figura 32: Índice NDWI, Imagen SPOT ATu	62
Figura 33: Índice NDWI-red, Imagen Landsat DOS.....	63
Figura 34: Índice NDWI-red, Imagen SPOT con corrección TOA	63
Figura 35: Índice NDWI-red, Imagen SPOT con corrección ATCOR marítima.....	63
Figura 36: Índice NDWI-red, Imagen SPOT con corrección ATCOR urbana.....	64
Figura 37: Mapa de NDWI en imagen Landsat con corrección DOS	66
Figura 38: Mapa de NDWI en base a una imagen SPOT de reflectancia TOA	67
Figura 39: Mapa de NDWI en imagen SPOT ATCOR marítima (Atm)	68
Figura 40: Mapa de NDWI en imagen SPOT ATCOR urbana	69
Figura 41: Firmas espectrales puntos del 1 al 5 (SPOT TOA)	72
Figura 42: Firmas espectrales puntos del 6 al 10 (SPOT TOA)	72
Figura 43: Firmas espectrales puntos del 1 al 5 (SPOT DOS).....	73
Figura 44: Firmas espectrales puntos del 6 al 10 (SPOT DOS).....	73
Figura 45: Firmas espectrales puntos del 1 al 5 (SPOT ATm).....	74
Figura 46: Firmas espectrales puntos del 6 al 10 (SPOT ATm).....	74
Figura 47: Firmas espectrales puntos del 1 al 5 (SPOT ATu).....	75
Figura 48: Firmas espectrales puntos del 6 al 10 (SPOT ATu).....	75
Figura 49: Mejor correlación entre concentración de clorofila-a y bandas SPOT DOS.....	77
Figura 50: Mejores correlaciones de concentración de clorofila-a y bandas SPOT ATm.....	77
Figura 51: Mejores correlaciones de concentración de clorofila-a y bandas SPOT ATu.....	78
Figura 52: Mapa de concentración de clorofila-A, modelo NIR-B.....	80

Figura 53: Mapa de concentración de clorofila-A, modelo R-B	81
Figura 54: Mapa de concentración de clorofila-A, modelo R/G	82
Figura 55: Mapa de estado trófico modelo NIR-B.....	83
Figura 56: Mapa de estado trófico modelo R-B	84
Figura 57: Mapa de estado trófico modelo R/G	85

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características de los productos Landsat 8	9
Tabla 2: Características de los productos SPOT 6 y 7	10
Tabla 3: Regiones del espectro electromagnético.....	14
Tabla 4: Estado Trófico y TSI	18
Tabla 5: Coordenadas del área de estudio	23
Tabla 6: Unidades de análisis observación e información	27
Tabla 7: Datos raster empleados	32
Tabla 8: Escalas y nivel de detalle asociado por imagen.....	34
Tabla 9: Principales ecuaciones para estimación de clorofila-a	44
Tabla 10: Principales ecuaciones desarrolladas para estimación de clorofila-a	45
Tabla 11: Longitud de onda incluida turbidez	51
Tabla 12: Longitud de onda, sin turbidez	51
Tabla 13: Datos finales de clorofila-a	52
Tabla 14: Valores finales de eutrofización en los puntos de muestreo.....	52
Tabla 15: Resultados de índices aplicados	64
Tabla 16: Resultados de índices. Segundo análisis	65

INDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1: Conservación muestras	29
Fotografía 2: Ejemplo de Muestra tomada	48
Fotografía 3: Laguna Mayor de los Humedales de Villa	48
Fotografía 4: Preservación de las muestras	49
Fotografía 5: Muestras de agua.....	49
Fotografía 6: Espectrofotómetro Lambda 45 Perkin Elmer	49
Fotografía 7: Cubeta espectrofotométrica	50
Fotografía 8: Colocación del papel filtro	98
Fotografía 9: Preparación del embudo.....	98
Fotografía 10: Medición de la muestra.....	99
Fotografía 11: Filtración de la muestra.....	99
Fotografía 12: Muestras en papel filtro.....	100
Fotografía 13: Ingreso de la muestras al congelador luego del filtro	101
Fotografía 14: Congelador que se utilizó en el proceso.....	101
Fotografía 15: Acetona 90 %.....	102
Fotografía 16: Preparación de la muestra en tubos con acetona al 90%	102
Fotografía 17: Equipo para emitir sonidos en las muestras	103
Fotografía 18: Centrífuga	103
Fotografía 19: Muestras centrifugadas.....	104
Fotografía 20: Cubeta espectrofotométrica	104

INDICE DE ANEXOS

<i>Anexo 1: Ficha Técnica de Firma Espectral</i>	93
Anexo 2: Materiales de laboratorio	96
Anexo 3: Procedimiento de Laboratorio.....	98
Anexo 4: Código para la regresión lineal	105

RESUMEN

En la gestión de humedales costeros existe una problemática ligada a la falta de información sobre parámetros ecológicos. Actualmente los sistemas de teledetección se pueden emplear como una herramienta para cubrir esa necesidad y apoyar en las labores de monitoreo, control y gestión de los recursos hídricos. En el presente trabajo de investigación se ha efectuado un análisis para determinar la distribución espacial de la concentración de clorofila-a en la Laguna Mayor del Refugio de Vida Silvestre los Pantanos de Villa (Chorrillos).

La metodología propuesta emplea imágenes satelitales ópticas, a las cuales se aplicó diversas correcciones, consta de dos etapas principales: La primera consiste en la determinación del borde del cuerpo de agua y la segunda permite estimar la concentración de clorofila-a usando algoritmos empíricos es decir apoyados por muestreo dentro de la zona de estudio y métodos estadísticos.

La detección del borde de la laguna demostró ser más efectiva empleando el método NDWI en comparación a otros índices analizados (NDWI-red, MNDWI). Respecto a la concentración de Clorofila-a, las imágenes del satélite SPOT fueron las más apropiadas para realizar su estimación; en específico con los datos obtenidos luego de aplicar el algoritmo de corrección ATCOR, se encontraron correlaciones altas y significativas en 3 modelos de bandas espectrales: Infrarrojo Cercano con Azul ($R^2 = 0.801$ y valor-p = 0.0065), Rojo con Azul ($R^2 = 0.882$ y valor-p = 0.0017) y Rojo con Verde ($R^2 = 0.723$ y valor-p = 0.0152).

Palabras clave: Teledetección, clorofila-a, humedales costeros

ABSTRACT

In the management of coastal wetlands there is a problem linked to the lack of information on ecological parameters. Currently, remote sensing systems can be used as a tool to cover this need and support the work of monitoring, control and management of water resources. In the present research work, an analysis has been carried out to determine the spatial distribution of the concentration of chlorophyll-a in the “Laguna Mayor of the Refugio de Vida Silvestre de los Pantanos de Villa (Chorrillos)”.

The proposed methodology uses optical satellite images, to which various corrections were applied, it consists of two main stages: The first consists of determining the edge of the water body and the second allows estimating the concentration of chlorophyll-a using empirical algorithms, that is, supported by sampling within the study area and statistical methods.

The detection of the edge of the lagoon proved to be more effective using the NDWI method compared to other indices analyzed (NDWI-red, MNDWI). Regarding the Chlorophyll-a concentration, the SPOT satellite images were the most appropriate for estimating it; specifically with the data obtained after applying the ATCOR correction algorithm, high and significant correlations were found in 3 spectral band models: Near Infrared with Blue ($R^2 = 0.801$ and $p\text{-value} = 0.0065$), Red with Blue ($R^2 = 0.882$ and $p\text{-value} = 0.0017$) and Red with Green ($R^2 = 0.723$ and $p\text{-value} = 0.0152$).

Keywords: Remote Sensing, chlorophyll-a, coastal wetlands

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

Los humedales, son considerados áreas de interés internacional desde 1962 con la Primera Conferencia Internacional sobre Conservación de Humedales (Conferencia MAR). Este interés se plasmó en La Convención sobre los Humedales de Importancia Internacional, conocida como la Convención de Ramsar la cual tiene como misión la conservación y el uso racional de los humedales mediante acciones locales y nacionales y gracias a la cooperación internacional contribuir al logro de un desarrollo sostenible en todo el mundo. Perú se adhirió a este convenio el 30 de marzo de 1992, y tiene hasta el momento 13 humedales incluidos en la Lista Ramsar (<https://ramsar.org/wetland/peru>).

En este estudio se busca estimar la clorofila-a superficial distribuida sobre el cuerpo de agua de un humedal mediante Teledetección para así demostrar la factibilidad del uso de imágenes satelitales en el análisis de humedales costeros en el Perú, además el análisis se apoyó con la toma de muestras in situ las cuales fueron analizadas en laboratorio. El área de estudio elegida es la laguna mayor de los Pantanos de Villa, el humedal más importante en Lima Metropolitana e incluido actualmente dentro del casco urbano.

Es importante señalar que este trabajo de investigación ha sido desarrollado con la finalidad de contribuir con Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) los cuales son una serie de metas impulsadas por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) enfocadas en mejorar la calidad de vida en todos sus enfoques: ambiental, sanitario, económico entre los más resaltantes, siendo la gestión de los recursos hídricos una de las principales aristas de los ODS. En concreto se busca contribuir significativamente con el Objetivo 6 (Agua limpia y saneamiento), mediante los indicadores de los objetivos 6.3 y 6.6. Asimismo, la investigación se encuentra indirectamente relacionado con los Objetivos 14 (Vida subacuática) y 15 (Vida en ecosistemas terrestres).

La presente investigación ha sido dividida en capítulos, los cuales son descritos de manera resumida a continuación: En el Capítulo I, se plantea el problema y se definen las variables las cuales permiten precisar nuestro análisis. En el Capítulo II presentamos el Marco Teórico el cual permite

definir las bases teóricas que sustentan la investigación y poder detallar los principales términos empleados. En el Capítulo III, presentamos las hipótesis y variables asociados a nuestra investigación. En el capítulo IV detallamos los Materiales y Métodos empleados para realizar nuestro procesamiento de datos, el cual está basado en imágenes satelitales. En el capítulo V presentamos los resultados obtenidos y además se detalla el análisis de los mismos. Finalmente presentamos las Conclusiones y Recomendaciones de la presente tesis.

1.2. Planteamiento del problema

1.2.1. Descripción de la problemática

En la ciudad de Lima, se encuentran “Los Pantanos de Villa”, un ecosistema de tipo humedal costero, ubicado en la ciudad de Lima, el cual está compuesto por varias lagunas, las cuales albergan una gran cantidad de especies de flora y fauna, por ello en 1989 se estableció el Refugio de Vida Silvestre Pantanos de Villa, un Área Natural Protegida por el Estado, además por tener una gran importancia nacional e internacional, es reconocido como sitio Ramsar a partir del 20 de enero de 1997, debido a formar parte de un corredor ecológico en la ruta migratoria de muchas especies de aves, a lo largo de la franja costera peruana del Océano Pacífico.

Sin embargo, el proceso de urbanización en las inmediaciones en Los Pantanos de Villa ha alterado la dinámica natural del ecosistema, generando contaminación, pérdida de la cubierta vegetal, aumento de la escorrentía de nutrientes, lo cual degrada la calidad de los cuerpos de agua, principalmente en la denominada Laguna Mayor la cual además no se encuentra demarcada apropiadamente.

Estos cambios y presiones causan eutrofización (cantidad excesiva de nutrientes en el agua, que el sistema de agua no puede tolerar), mayor turbidez (deterioro de la claridad del agua). También suponen un riesgo para la salud humana y animal.

Por lo tanto, la gestión y monitoreo de los cuerpos de agua en los Pantanos de Villa debe ser una prioridad en la gestión de los recursos ambientales y de ser necesario plantear un monitoreo de bajo costo y efectivo. Existe una alternativa que es emplear técnicas de teledetección las cuales pueden aportar en la identificación de características biológicas de este humedal costero. Las técnicas deberían ser evaluadas de una manera continua dados los problemas actuales de la contaminación de sus aguas.

1.2.2. Formulación del problema

1.2.2.1. Problema Principal

¿En qué medida la Teledetección permite estimar la concentración de clorofila-a en humedales costeros? Caso específico: Laguna Mayor de los Pantanos de Villa, Lima - Perú

1.2.2.2. Problemas Específicos

¿Cuál es el tipo de imagen más apropiada para delimitar el perímetro de la laguna mayor de los Pantanos de Villa mediante Teledetección?

¿Es posible establecer una correlación entre la concentración de Clorofila A determinada en laboratorio y los valores radiométricos de imágenes satelitales?

¿Se puede determinar el estado trófico de la laguna mayor de los humedales de Villa mediante la Teledetección?

1.3. Objetivos de la Investigación

1.3.1. Objetivo principal

Estimar la concentración de Clorofila-A en la laguna mayor de los Humedales de Villa mediante técnicas de Teledetección.

1.3.2. Objetivos específicos

- a) Cartografiar y delimitar el perímetro de la laguna mayor de los Humedales de Villa mediante teledetección.
- b) Determinar la mejor correlación entre la concentración de clorofila-A y la medición de los sensores multiespectrales satelitales.
- c) Elaborar mapas del estado trófico en la laguna mayor en base a la distribución de Clorofila A estimada.

1.4. Importancia y alcance de la investigación

1.4.1. Importancia teórica

Los humedales son ecosistemas cruciales para mantener la biodiversidad y la estabilidad ecológica (Steven and Toner, 2004; Lagos

et al., 2008), sin embargo, también son excepcionalmente vulnerables a la mala gestión humana y al cambio climático.

Necesidad de estimar la Clorofila A: La mitad del oxígeno que sustenta la vida en la tierra es producida por organismos flotantes en la superficie de las aguas similares a una planta, llamado fitoplancton. Ellos son los productores más primarios de la red alimentaria en los sistemas acuáticos debido a su capacidad de fotosíntesis, un proceso de fabricación de compuestos orgánicos utilizando dióxido de carbono disuelto y energía solar. Por lo tanto, el fitoplancton es el agente de producción primaria en los cuerpos de agua mientras se mantiene el ciclo alimentario en el agua. Debido a esto, el fitoplancton es interesante para los investigadores al evaluar los ciclos biogeoquímicos. Sin embargo, en aguas continentales, monitoreo y los programas de investigación sobre fitoplancton se centran menos en la aplicación biogeoquímica; de hecho, están más preocupados por controlar las intervenciones. Dicho esto, la presencia del impacto humano, principalmente la eutrofización y el cambio climático, tiene una influencia severa en el equilibrio natural del fitoplancton y puede causar un fenómeno llamado floración.

1.4.2. Importancia práctica

Las tecnologías de evaluación que pueden estudiar los humedales incluyen modelado, sensores remotos (terrestres y satelitales) y muestreo in-situ. En los apéndices del Marco para el Inventario de Humedales Ramsar, se indican las recomendaciones para la selección de datos de teledetección apropiados y un listado de los mismos.

La teledetección nos permite monitorear una serie de indicadores de la calidad del agua que reflejan el estado de los ecosistemas de agua dulce. Estos indicadores observables desde el espacio nos ayudan a estimar entre otros las concentraciones de Clorofila-a, Materia suspendida total (TSM), Materia orgánica disuelta coloreada (CDOM), y otros.

1.4.3. Importancia social

En el año 2015, luego del cumplimiento del plazo de los 8 Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), los Estados miembros acordaron una nueva agenda para el desarrollo: La Agenda de Desarrollo 2030, la cual busca fomentar el desarrollo sostenible en todas sus aristas: social, ambiental económico y de esta manera lograr una mejor sociedad mediante los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Los ODS directamente relacionados con nuestra investigación son los objetivos

6 (Agua limpia y Saneamiento), 14 (Vida submarina) y 15 (Vida de ecosistemas terrestres), así como algunos de sus objetivos específicos, (Figura 1).

Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible - ODS y la implementación de la Agenda 2030		
		
6.3 Para 2030, mejorar la calidad del agua mediante la reducción de la contaminación, la eliminación del vertimiento y la reducción al mínimo de la descarga de materiales y productos químicos peligrosos, la reducción a la mitad del porcentaje de aguas residuales sin tratar y un aumento sustancial del reciclado y la reutilización en condiciones de seguridad a nivel mundial	14.2 Para 2020, gestionar y proteger de manera sostenible los ecosistemas marinos y costeros con miras a evitar efectos nocivos importantes, incluso mediante el fortalecimiento de su resiliencia, y adoptar medidas para restaurarlos con objeto de restablecer la salud y la productividad de los océanos	15.1 Para 2020, velar por la conservación, el restablecimiento y el uso sostenible de los ecosistemas terrestres y los ecosistemas interiores de agua dulce y los servicios que proporcionan, en particular los bosques, los humedales, las montañas y las zonas áridas, en consonancia con las obligaciones contraídas en virtud de acuerdos internacionales
6.6 Para 2020, proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos los bosques, las montañas, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos	14.5 Para 2020, conservar por lo menos el 10% de las zonas costeras y marinas, de conformidad con las leyes nacionales y el derecho internacional y sobre la base de la mejor información científica disponible	15.5 Adoptar medidas urgentes y significativas para reducir la degradación de los hábitats naturales, detener la pérdida de la diversidad biológica y, para 2020, proteger las especies amenazadas y evitar su extinción
6.a Para 2030, ampliar la cooperación internacional y el apoyo prestado a los países en desarrollo para la creación de capacidad en actividades y programas relativos al agua y el saneamiento, incluidos el acopio y almacenamiento de agua, la desalinización, el aprovechamiento eficiente de los recursos hídricos, el tratamiento de aguas residuales y las tecnologías de reciclaje y reutilización		15.8 Para 2020, adoptar medidas para prevenir la introducción de especies exóticas invasoras y reducir de forma significativa sus efectos en los ecosistemas terrestres y acuáticos y controlar o erradicar las especies prioritarias

Figura 1: ODS relacionados a esta investigación

CAPÍTULO II

2. MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes de investigación

Ámbito Nacional

A nivel nacional se encontraron las siguientes referencias sobre trabajos similares a nuestro estudio:

En la tesis titulada “Análisis Espacio-Temporal del Comportamiento de la Clorofila-A mediante imágenes satelitales en la Represa Aguada Blanca para el año 2017” (Bellido, 2019), se estudió la variabilidad y comportamiento de la clorofila A en la Represa Aguada Blanca mediante imágenes satelitales Sentinel 2A obteniendo como resultado mapas de la variabilidad espacio-temporal de Clorofila-a.

En la tesis titulada “Estudio de Floraciones algales mediante indicadores de concentración de Clorofila-A y Temperatura Superficial en el Embalse de Condoroma utilizando técnicas de Teledetección” (Rodriguez, 2019), se emplearon imágenes satelitales Landsat 8 y Sentinel 2.

En la tesis titulada “Determinación Analítica de detergentes en las aguas de Los Pantanos de Villa” (Alvarez Gutierrez, 2016), se realizó una determinación analítica de detergentes en las aguas de los Pantanos de Villa (diciembre 2013 y julio 2014) teniendo por objetivo determinar contenidos de nitrógeno, fosforo disuelto y fósforo total a fin usarlos como indicadores de eutrofización en las lagunas, concluyendo que las lagunas Sur y Anap están hipereutorfizadas.

En la tesis titulada “Conexión Trófica entre las comunidades planctónicas y la avifauna silvestre en Pantanos de Villa, Lima, Perú” (Cepeda Agurto, 2016), se tuvo como objetivo encontrar conexiones tróficas entre los organismos primarios de las comunidades acuáticas (plancton) y los mayores depredadores de este ecosistema (las aves), durante el estudio se pudo verificar que todas las lagunas presentaron estado eutrófico.

El Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú, **MINAM** (2018), representa gráficamente la distribución espacial de los ecosistemas naturales continentales del Perú, a una escala nacional, para este mapa se realizó una cartografía de mediana escala de los Humedales de Villa.

Ámbito internacional

A nivel mundial se encontraron las siguientes tesis relacionadas a nuestro estudio:

En el Trabajo final de Carrera titulado “Análisis de la clorofila-a en el agua a partir de una imagen multiespectral Quickbird en la zona costera de Gandia” (Estruch Benito, 2011), se relacionaron los valores de clorofila-a medidos in-situ con la datos espectrales de una imagen Quickbird. Esto le permitió crear un mapa temático en el cual se observaron problemas ambientales en el puerto de Gandía (España).

En la tesis de maestría titulada “Análisis espacio-temporal del efecto del sistema de aireación artificial en el embalse San Roque. Integración de datos de campo y técnicas geoespaciales” (Ferral, 2012), se emplearon imágenes satelitales y datos in-situ de concentración de clorofila-a para analizar la calidad de agua. De esta manera, se halló una alta correlación positiva entre el índice NDVI y la concentración de clorofila en el embalse. Además, se generó un modelo de regresión lineal múltiple para estimar clorofila-a a partir de las bandas TM1 y TM4 del satélite LANDSAT-5. Gracias a este modelo se elaboró mapas de estado trófico del embalse a partir de una clasificación de la imagen.

En la tesis de maestría titulada “*Estimation of Phytoplankton Chlorophyll-a Concentration in the Western Basin of Lake Erie Using Sentinel-2 and Sentinel-3 Data*”, (Mollae, 2018) se evaluó el potencial de los datos del Instrumento Sentinel-3 Ocean and Land Color Instrument (OLCI) y Sentinel-2 Multiespectral Instrument (MSI) para monitorear las floraciones de algas en el lago Erie. Los productos relacionados con la clorofila-a (CI-a) se probaron utilizando datos de monitoreo de la NOAA-Great Lakes Chl-a durante el verano de 2016 y 2017. Se emplearon datos de Radiancia y Reflectancia en la parte superior de la atmósfera (TOA).

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Teledetección

2.2.1.1. Definición

Existen varias maneras de definir la Teledetección, Campbell (2011) indica que: “La teledetección es la medición a distancia de propiedades de la Tierra a través del registro de la energía electromagnética emitida, reflejada o dispersada por la superficie terrestre”

También la NASA la define como "La teledetección es el proceso de detectar y medir las características físicas de un objeto mediante la medición de la luz que emite o refleja."

Por otro lado, JARS (1993) define la teledetección como: "la ciencia y la tecnología por medio de la cual las características de los objetos de interés pueden ser identificados, medidos o se pueden analizar sus características sin contacto directo"

2.2.1.2. Imágenes satelitales

Son representaciones visuales de arreglos matemáticos compuestos por elementos individuales, conocidos como píxeles (derivado del inglés "*picture element*"). Estos elementos pueden ser obtenidos por instrumentos que escanean sistemáticamente porciones de la superficie de la Tierra, registrando fotones reflejados o emitidos. Así cada pixel representa el brillo de una pequeña región en la superficie de la Tierra, registrado digitalmente como un valor numérico, generalmente con valores distintos para cada uno. Se pueden generar imágenes en color compuestas por varias matrices de este tipo de una misma área de fondo, cada una de las cuales representa brillos en una región separada del espectro electromagnético.

Imágenes satelitales Landsat

Landsat 8 es un tipo de sensor de la serie Landsat, fue lanzado en el 2013 y posee los instrumentos "Operational Land Imager" (OLI) y "Thermal Infrared Sensor" (TIRS) los cuales permiten obtener imágenes pancromáticas (PAN), multiespectrales (MS) y térmicas (TIRS). Una de las ventajas de este satélite es su sistema de adquisición, basado en escenas del tipo path /row, el Sistema de Referencia Mundial-2 (WRS-2 por sus siglas en inglés) con lo cual puede adquirir escenas de casi toda la Tierra en 16 días. Las principales características de este satélite y sus productos son:

Datos del satélite	
Nombre comercial	Landsat 8
Lanzamiento	11 de febrero de 2013
Altitud	705 km
Tipo	Sincrónico al sol
Ciclo	16 días
Características de los productos	
Bandas espectrales ópticas	Pancromático: 500-680 nm Azul costero: 430-450 nm Azul: 450-510 nm Verde: 530-590 nm

	Rojo: 640-670 nm Infrarrojo Cercano: 850-880 nm Infrarrojo medio 1: 1570-1650 nm Infrarrojo medio 2: 2110 - 2290 nm
Resolución del producto	PAN: 15 m; MS: 30 m
Ancho de toma	285 km aproximadamente
Radiometría de adquisición	16 bits por píxel
Productos	15 m PAN 30 m multiespectral
Niveles de Preprocesamiento	Nivel 1 Precision Correction (L1TP) Nivel 1 Systematic Terrain Correction (L1GT) Nivel 1 Geometric Systematic Correction (L1GS)
Exactitud de posición de imagen	12 metros de error circular, CE 90 para OLI
Capacidad de cobertura	Cobertura WRS-2: 170 km x 185 km
Formato de salida del producto	Carpeta comprimida. El producto contiene los metadatos (MTL) y las bandas separadas

Tabla 1: Características de los productos Landsat 8

Fuente: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-level-1-processing-details>

Imágenes satelitales SPOT

El sistema satelital SPOT está conformado por satélites ópticos de alta resolución espacial los satélites SPOT 6 y 7. Una de las ventajas de estos satélites es su amplio ancho de barrido (swath), que permite cubrir 3600 km² en una

escena estándar. Pueden obtener imágenes pancromáticas (PAN) y multiespectrales (MS) con resoluciones espaciales de 1,5 m y 6 m respectivamente. Las principales características de estos satélites y sus productos son:

Datos del satélite	SPOT 6 y SPOT 7
Número de satélites	2
Lanzamiento	SPOT 6: SPOT 7:
Altitud	694 km
Tipo	Sincrónico al sol
Ciclo	26 días
Características de los productos	
Bandas espectrales	Pancromático: 450-745 nm Azul: 450-520 nm Verde: 530-590 nm Rojo: 625-695 nm Infrarrojo Cercano: 760-890 nm
Resolución del producto	PAN: 1.5m; MS: 6.0m
Ancho de toma	60 km en el nadir

Radiometría de adquisición	12 bits por píxel
Ángulo de visión	estándar: +/- 30 °; Máximo: +/- 47 °
Productos	150-cm pancromático 150-cm color (Fusionado) 6-meter multiespectral Bundle: 150-cm PAN y 6 metros MS
Niveles de Preprocesamiento	Primary Ortho
Exactitud de posición de imagen	Con puntos de control terrestre: 1m Sin puntos de control terrestre: 8.5m (CE90 con datos de actitud refinados)
Capacidad de cobertura	Cobertura por tiras (mosaico): 100 km x 100 km Cobertura estéreo: 60 km x 280 km
Formato de salida del producto	DIMAP V2. El producto contiene los metadatos y un archivo de imagen

Tabla 2: Características de los productos SPOT 6 y 7

Fuente: SPOT 6 & SPOT 7 Imagery - User Guide, Julio 2013 – V 1.0 (Traducción propia)

2.2.1.3. Correcciones de Imágenes Satelitales

Las imágenes de satélite ópticas se ven afectadas por diferentes tipos de errores que alteran la información que proporcionan. Estos errores pueden deberse a algunos de estos motivos:

- Problemas en los sensores, que provocan que algunos píxeles no reflejen la realidad (corrección radiométrica).
- Efectos de la atmósfera, que modifican de forma sistemática los valores de los píxeles (corrección atmosférica).

Corrección radiométrica

Chander (2009) señala que: “Consiste en convertir el nivel digital (ND) en un valor de radiancia espectral para cada una de las bandas del sensor a partir de una transformación lineal”.

Corrección atmosférica

Existen varias técnicas de corrección atmosférica para reducir la influencia de la atmósfera (vapor de agua y tipo de aerosol), iluminación solar, geometría de visualización del sensor e iluminación del terreno en los números digitales que componen las imágenes ópticas.

También Chávez (1988) indica qué: “El método de corrección atmosférica DOS, conocido como "Dark Object Subtraction", es una técnica ampliamente utilizada en el procesamiento de imágenes de

teledetección para eliminar los efectos atmosféricos y mejorar la calidad de las imágenes satelitales. Se basa en la suposición de que en cada imagen existe al menos un píxel que representa una superficie con reflectancia nula en todas las bandas. Estos píxeles se conocen como "objetos oscuros" y se asumen como áreas sin reflectancia de luz solar directa debido a la presencia de aerosoles atmosféricos o efectos de dispersión de luz"

Por otro lado, Rudolf Richter (2006) desarrolló lo siguiente: "El método empleado para la corrección atmosférica de las imágenes SPOT es conocido como ATCOR, el cual es un método aplicable a sensores ópticos con un ángulo de barrido pequeño en el cual los efectos del ángulo de escaneo sobre radiancia y transmitancia son insignificantes o despreciables. El algoritmo funciona con una base de datos de funciones de corrección atmosférica almacenadas en tablas de búsqueda, para diferentes perfiles de altitud de presión, humedad y tipo de aerosol. Se requiere modelos de transferencia radiativa junto con información de condiciones atmosféricas, nubes y aerosoles"

2.2.1.4. Propiedades Ópticas Aparentes

Barbosa (2019) indica que: "las superficies acuáticas afectadas por las propiedades ópticas aparentes se ven afectadas de distinta manera por las AOP, en el caso de superficies con presencia de clorofila, el comportamiento espectral típico muestra un ascenso en las bandas azul y verde, luego un descenso marcado en la banda roja y una pequeña concentración en la banda infrarroja. Para el caso de aguas con alta presencia de sedimentos se tiene un ascenso constante desde la banda azul hasta alcanzar un pico en el rojo, luego al comenzar el infrarrojo cercano se muestra un descenso marcado hasta llegar a valores aproximados del 5 %. Las aguas con alta presencia de CDOM poseen valores muy bajos de reflectancia en todas las bandas"

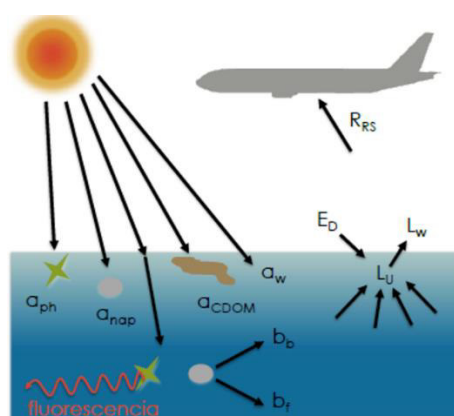


Figura 2: Propiedades Ópticas Aparentes

Donde:

a = absorción por diversos objetos

b = dispersión

L_w = radiancia partiendo del agua

L_u = radiancia ascendente

E_d = radiancia descendente

R_{rs} = reflectancia de teledetección (r_s)

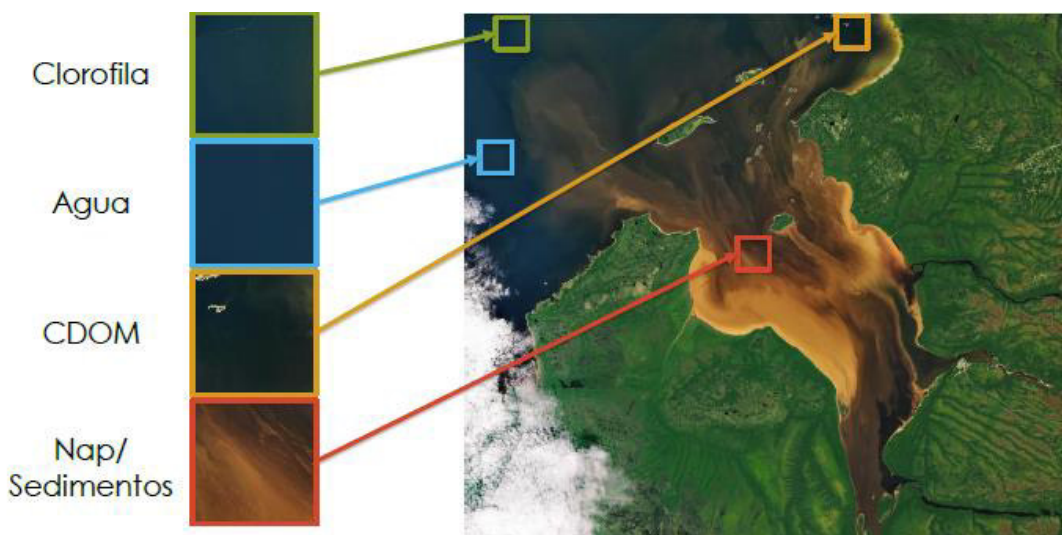


Figura 3: Propiedades Ópticas Aparentes

Fuente: (Barbosa et al., 2019)

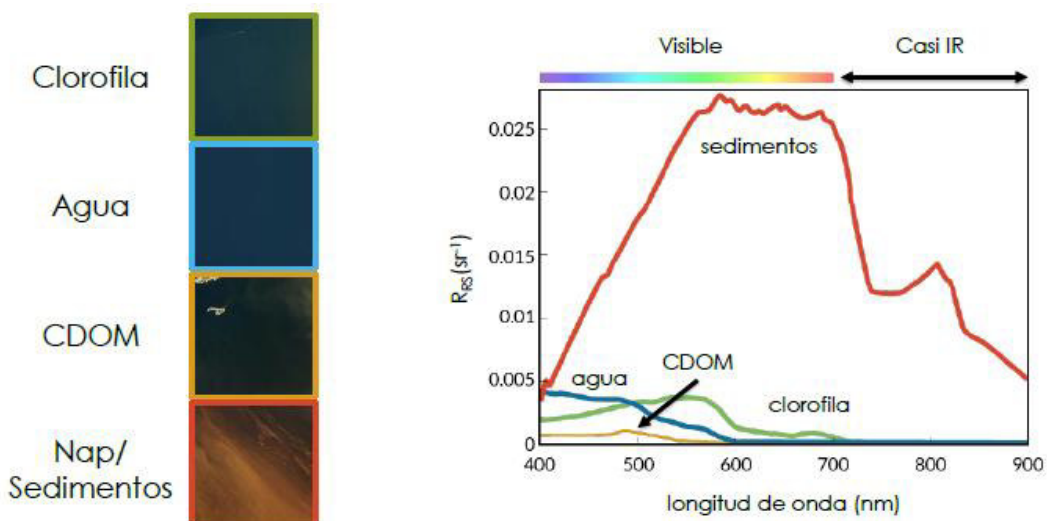


Figura 4: Propiedades Ópticas Aparentes

Fuente: (Barbosa et al., 2019)

2.2.1.5. Índices espectrales de agua

El autor McFeeters (1996) menciona que: “Desde la década de 1970, académicos de todo el mundo han desarrollados índices para

determinar de rápidamente la presencia de cuerpos de agua y suelos con alta saturación de humedad en imágenes satelitales ópticas. Los posibles valores de los índices oscilan entre de -1 a +1, siendo los valores menores a 0 superficies sin presencia de vegetación o agua y los mayores a 0 superficies con presencia de agua y vegetación. Mientras más cercano sea el valor a 1, la superficie posee más contenido de agua. Así, se puede emplear el índice como referencia para delimitaciones directas de cuerpos de agua”.

2.2.1.6. El espectro electromagnético

La radiación electromagnética puede ser clasificada en regiones diferenciadas por su longitud de onda debido a que presentan cierta similitud en sus características, este agrupamiento es conocido como “espectro electromagnético” (Figura 5).

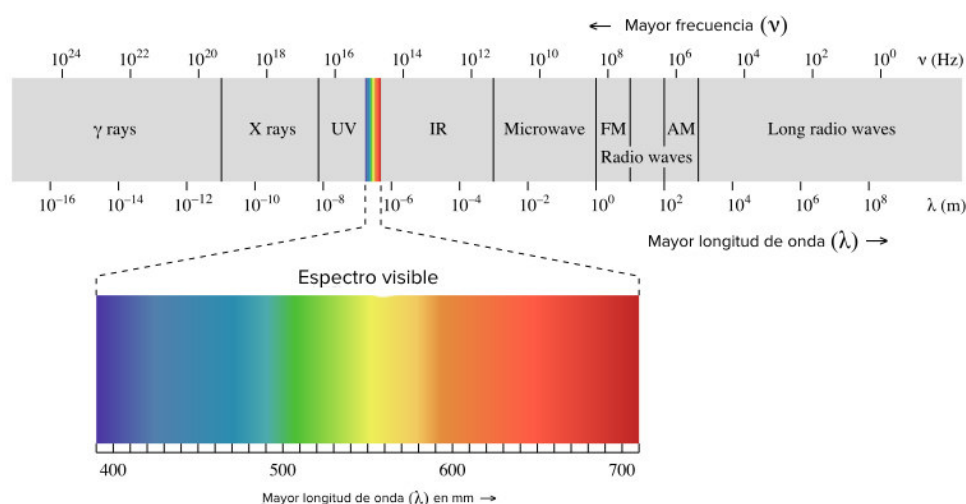


Figura 5: Espectro electromagnético

Fuente: ChemWiki de UC Davis (Universidad de California en Davis)

Los límites fijados (tabla 1) son aproximados, pudiendo variar entre diferentes autores, también existen superposiciones entre regiones contiguas. Además, cada una de estas regiones se divide en subcategorías. En nuestro caso es de interés la luz visible, la cual se puede separar en azul (0.4 – 0.5 μm), verde (0.5 – 0.6 μm) y rojo (0.6 – 0.7 μm) para facilitar su análisis.

Región	Rango de longitudes
Rayos γ	$<0.03 \text{ nm}$
Rayos X	$0.03 - 300 \text{ nm}$
Ultravioleta	$0.3 - 0.38 \text{ }\mu\text{m}$
Visible	$0.38 - 0.72 \text{ }\mu\text{m}$
Infrarrojo	$0.72 - 300 \text{ }\mu\text{m}$
Microondas	$300 \text{ }\mu\text{m} - 20 \text{ cm}$
Radio TV	$>20 \text{ cm}$

Tabla 3: Regiones del espectro electromagnético

2.2.2. Concentración de Clorofila-a

2.2.2.1. Definición de concentración de Clorofila-a

Existen diferentes conceptos de Clorofila-a como se describen a continuación:

Gregor & Marsálek (2004) indican que: “la concentración de clorofila-a permite estimar en forma indirecta la biomasa de las comunidades fitoplanctónicas, debido a que es el principal pigmento fotosintético presente en las algas”.

También el autor Pinto et al., (2001) describe que: “la concentración de clorofila-a también es un indicador del grado de contaminación de los ecosistemas acuáticos”.

Por otro lado, la Clorofila-a fue descubierta por los químicos Pelletier y Caventou (1817) que lograron separar la clorofila de las hojas de las plantas.

2.2.2.2. Definición de humedales

La Convención de Ramsar (2007) describe que: “se consideran humedales las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de agua, naturales o artificiales, permanentes o temporales, estancadas o corrientes dulces, salobres o salados, incluidos las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros” Artículo 1.1, www.ramsar.org).

El Manual Ramsar (2007) dice que: “Los humedales son aquellas zonas donde la tierra se encuentra cubierta de agua, generalmente, debido a que la capa freática se encuentra cerca de la superficie; de modo que el agua es el principal factor que determina las características del medio, incluyendo la flora y fauna”.

Clasificación

Los humedales naturales se pueden agrupar en los siguientes grupos principales (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2007):

- Lacustres: son humedales relacionados a lagunas naturales de aguas dulces, saladas o salobres.
- Estuarios: aquellos humedales conectados a la desembocadura de ríos, por lo que contienen aguas salobres, entre estos humedales, resalta la formación de ecosistemas de manglares.
- Marino-costeros: son los humedales relacionados principalmente a la presencia de agua marina.
- Ribereños: aquellos humedales presentes en las riberas de los ríos.
- Palustres: son aquellos relacionados a zonas pantanosas como marismas y ciénagas.
- Artificiales: son reservorios de agua construidos por las sociedades humanas.

2.2.2.3. Propiedades ópticas de la clorofila

Existen algunos autores que mencionan propiedades ópticas de la clorofila encontrada en las hojas de las plantas como se menciona a continuación:

Carter y Supieran, (2002) indican que: “Las propiedades ópticas de las hojas de las plantas, como la absorbancia (A), transmitancia (T) y reflectancia (R) de la radiación solar son fuertemente dependientes de la concentración de clorofila. Hay diferencias en la concentración de clorofila entre especies de plantas”

También los autores Augenstein (1991); Blackmer (1996); Barbar (2006) sustentan que: “Existen índices de reflectancia espectral basados en las propiedades ópticas para estimar la concentración de clorofila y otros pigmentos en las hojas. Estos índices son útiles para estimar la biomasa y el estado fisiológico de cultivos, así como en la vegetación acuática”

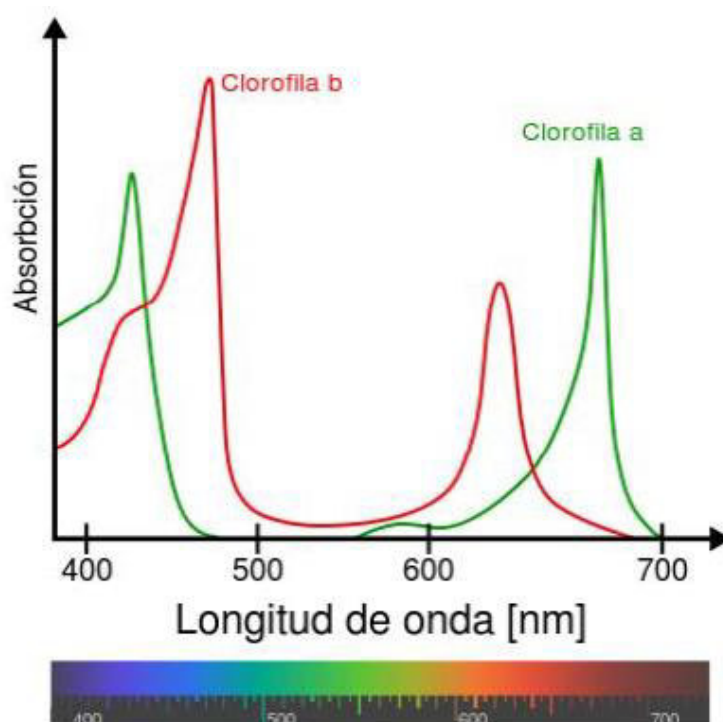


Figura 6: Espectro de absorción de la Clorofila A

2.2.2.4. Análisis para obtener la concentración de Clorofila-a

Existen diferentes tipos de análisis para determinar la concentración de Clorofila entre ellos tenemos los siguientes:

Jeffrey & Humphrey (1975) indican que: “la determinación de la concentración de clorofila se realiza a través de la espectrofotometría que es el análisis de los pigmentos fotosintéticos mediante un espectrofotómetro y la utilización de un solvente”

Por otro lado, la APHA (1998) menciona que: “Para estimar la clorofila existen diferentes métodos, procedimientos y modelos matemáticos, desarrollados con el objeto de minimizar los errores ocasionados por la presencia de otros pigmentos fotosintéticos y de algunos compuestos químicos en el agua”.

También los autores Banderas (1991); Pérez (2002); Ramírez y Alcaráz (2002) mencionan que: “Para cuantificar la clorofila, se reportan en la literatura diferentes solventes (acetona, metanol, etanol, entre otros) y procedimientos de extracción (maceración, sonicación, calentamiento y congelamiento), además de la aplicación de ecuaciones (monodi- y tricromáticas) que utilizan distintas longitudes de onda”.

2.2.2.5. Espectrofotometría

Es un método usado para medir la cantidad de luz que una sustancia absorbe, al medir la intensidad de un haz de luz que pasa través de una muestra de la sustancia en solución.

Se basa en el principio que cada compuesto absorbe, refleja o transmite luz es un determinado rango de longitud de onda. Así se obtiene una medida de cuanto absorbe o transmite una sustancia química. Por ello es considerado una técnica de análisis cuantitativo. El método espectrofotométrico se rige por la ley de Lambert-Beer.

Ley de Lambert-Beer

Es la combinación de las leyes de Lambert y Beer. Relaciona la atenuación de la luz con las propiedades del material a través del cual viaja. Es decir, establece que existe una relación lineal entre la absorbancia y la concentración de una muestra. Se escribe como:

$$A = \epsilon lc$$

Dónde:

A: Es la medida de absorbancia (adimensional)

ϵ : Absortividad molar o coeficiente de absorción

l: Longitud o espesor del medio (longitud de la cubeta)

c: Concentración de la solución

El coeficiente de extinción molar es una constante que varía para cada molécula. Dado que la absorbancia no tiene unidades, debido a que un espectrómetro estándar usa una cubeta de 1 cm de ancho, siempre se supone que l es igual a 1 cm. Dado que se conocen la absorción, ϵ y la longitud del camino, podemos calcular la concentración c de la muestra.

2.2.2.6. Índice trófico

Es un índice muy útil para conocer la calidad de un cuerpo de agua. Conocido como TSI, por sus siglas en inglés, fue desarrollado por Carlson (1977) tomando como base los valores de transparencia del disco de Secchi, pero también puede determinarse a partir de otros parámetros, tales como la concentración de clorofila y fósforo total en superficie, cuya relación con la transparencia se ha calculado previamente. Sus valores varían entre 0 (oligotrófico) y 100 (hipereutrófico). La siguiente fórmula es una variación realizada por Aizaki et al (1981).

$$\text{TSI (Clorofila)} = 10 \times \left(2.46 + \frac{\ln \text{Chl-a}}{\ln 2.5} \right) \text{mg/m}^3$$

Por tanto, de acuerdo a los valores que alcanzan el TSI y la clorofila podemos diferenciar cuatro categorías:

Estado Trófico	Rango TSI	Rango Clorofila-a
Oligotrófico	Menor a 30	Menor a 1.6
Mesotrófico	Menor a 30 menor a 60	Entre 1.6 a 25.6
Eutrófico	Mayor a 60 menor a 90	Entre 25.6 a 400
Hipereutrófico	Mayor a 90	Mayor a 400

Tabla 4: Estado Trófico y TSI

2.3. Definición de términos

Estado Trófico

Está definido por la productividad primaria de un ecosistema donde las algas o planta primitivas han facilitado la fijación de la vida de otros organismos por la liberación de oxígeno que ha permitido la colonización acuática y una mayor diversificación biológica.

La floración es un aumento de la población y la reproducción de las especies de fitoplancton en un crecimiento excesivo. Las floraciones pueden afectar la calidad del agua y causar la pérdida de la biodiversidad acuática. En general, las dos clases principales de fitoplancton son las algas y las cianobacterias cuyo pigmento principal es la Clorofila A.

La floración de algas puede ser un fenómeno natural significativo en aguas dulces, como un estímulo factor de productividad primaria. Esta ocurrencia natural puede tener lugar estacionalmente (p. Ej., verano) debido a las características del cuerpo de agua y las condiciones ambientales. La floración comúnmente ocurre con la presencia de un alto nivel de nutrientes, particularmente algunos de los fosfatos, colectivamente con una situación soleada, cálida y con menos viento o causas naturales, por ejemplo, una tormenta de lluvia. Aunque la floración de algas es un acontecimiento natural importante, en algunos casos, la floración severa puede tener problemas críticos para el ecosistema acuático. Por ejemplo, cuando los fosfatos ingresan a un cuerpo de agua en cantidades de alto nivel, contribuyen a acelerar el crecimiento de la biomasa viva. Las algas generalmente sobreviven una semana o, en aguas favorables condiciona hasta un verano entero, resultando en una concentración masiva de materia orgánica muerta que comienza a descomponerse. La descomposición necesita una cantidad significativa de disolución oxígeno

y conduce a una hipoxia severa que amenaza a los peces y los animales acuáticos durante el verano.

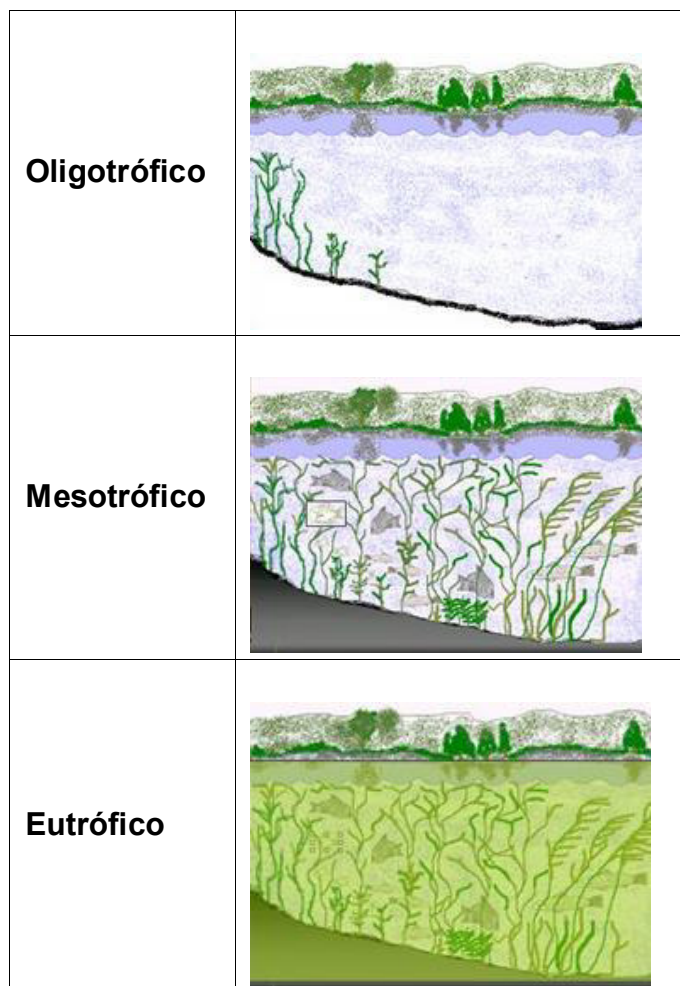


Figura 7: Niveles de concentración de nutrientes

Radiancia

Es el total de energía radiada en una determinada dirección por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Describe precisamente lo que mide un sensor montado en un satélite y utilizado para la Teledetección. Se mide en watts por metro cuadrado por estereorradián ($W / m^2 \cdot sr$).

Reflectancia

Es la relación de la radiancia reflejada dividida por la radiancia entrante. Esta relación tiene un aspecto direccional. La reflectancia proporciona una medida estandarizada, que es directamente comparable entre las imágenes. La reflectancia no es unitaria y, por lo tanto, se mide en una escala de 0 a 1 (0 a 100%). La reflectancia en el tope de la atmosfera (TOA por sus siglas en inglés) intenta no tomar en cuenta los efectos

atmosféricos. La reflectancia de la superficie intenta corregir los efectos atmosféricos.

Absorbancia

Se define como la cantidad de energía radiante absorbida por una sustancia, pura o en solución. En nuestro caso para cada longitud de onda de luz que pasa por el espectrofotómetro, se mide la intensidad de la luz que incide sobre la celda de referencia I_0 . También se mide la intensidad de la luz que sale a través de la celda de muestra para esa longitud de onda, dado el símbolo I . Si I es menor que I_0 , entonces la muestra ha absorbido parte de la luz (despreciando el reflejo de la luz en la superficie de la celda). Luego mediante fórmulas establecidas se obtiene la absorbancia de la muestra.

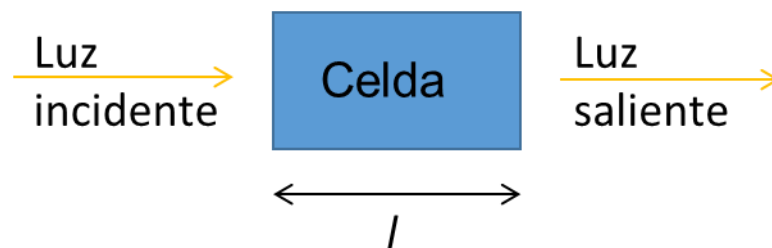


Figura 8: Luz absorbida por la muestra en la celda

CAPÍTULO III

3. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

Es posible estimar la concentración de clorofila A en los Humedales de Villa mediante el uso de técnicas de Teledetección como la correlación de valores obtenidos in situ y los valores radiométricos de los pixeles de una imagen satelital multiespectral del área de estudio.

3.2. Variables

3.2.1. Variable independiente

Teledetección

3.2.2. Variable dependiente

Concentración de Clorofila-a

3.3. Operacionalización de variables

VARIABLE Independiente	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Teledetección	Son los conocimientos y técnicas utilizadas para el análisis físico y geoespacial de objetos a distancia	Las mediciones son realizadas desde una plataforma móvil, como satélites, aviones, etc.	Geoespacial	Resolución espacial
				Escala Cartográfica
			Física	Análisis de firmas espectrales
				Histogramas de índices y umbrales
VARIABLE Dependiente	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Estimación de Concentración de Clorofila-a	Es un indicador de la calidad de cuerpos de agua al ser el principal pigmento fotosintético presente en las algas	Sera realizada a través de estimaciones apoyadas por métodos estadísticos y técnicas bioquímicas	Estadística	Coefficiente de determinación (r^2)
				Valor-p
			Bioquímica	Concentración de clorofila-a obtenida en laboratorio
				Estado Trófico

3.4. Matriz de consistencia

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variable Independiente
¿Se puede medir la concentración de clorofila-a en humedales costeros mediante Teledetección?	Estimar la concentración de Clorofila-A en la laguna mayor de los Humedales de Villa mediante técnicas de Teledetección	Es posible estimar la concentración de clorofila-a en humedales costeros mediante Teledetección.	Teledetección
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Especifica	Variable Dependiente
¿Cuál es el tipo de imagen más apropiada para delimitar el perímetro de la laguna mayor de los Pantanos de Villa mediante Teledetección?	Cartografiar y delimitar el perímetro de la laguna mayor de los Humedales de Villa mediante teledetección.	Las imágenes de alta resolución permitirán establecer una metodología más apropiada para delimitar el perímetro de la laguna mayor de los Pantanos de Villa mediante Teledetección	Estimación de Concentración de Clorofila-a
¿Es posible establecer una correlación entre la concentración de Clorofila A determinada en laboratorio y los valores radiométricos de imágenes satelitales?	Determinar la mejor correlación entre la concentración de clorofila-A y la medición de los sensores multispectrales satelitales.	Existe correlación entre la concentración de Clorofila A determinada en laboratorio y los valores radiométricos de imágenes satelitales	
¿Se puede determinar el estado trófico de la laguna mayor de los humedales de Villa mediante la Teledetección?	Elaborar mapas del estado trófico en la laguna mayor en base a la distribución de Clorofila A estimada.	Se puede determinar el estado trófico de la laguna mayor de los Pantanos de Villa, en base a la concentración de clorofila-a obtenida con a imágenes satelitales	

CAPÍTULO IV

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Área de Estudio

El área de estudio es la Laguna Mayor de los Pantanos de Villa, la cual es parte del Refugio de Vida Silvestre los Pantanos de Villa, ubicado en la costa central del Perú. Administrativamente está ubicado en el distrito de Chorrillos, provincia y departamento de Lima.

La extensión del Área Natural Protegida según la Memoria Descriptiva de DS-055-2006-AG es 263.27 hectáreas. Por otra parte, en el Mapa de Ecosistemas del Perú elaborado por el MINAM (2019) indica un área de 525.44 hectáreas.

Las coordenadas de sus extremos son:

	Latitud	Longitud
Esquina Noroeste	12° 12' 09" S	76° 59' 55" E
Esquina Sureste	12° 13' 21" S	76° 59' 02" E

Tabla 5: Coordenadas del área de estudio

4.1.1. Tipo de Humedal

Según la clasificación de humedales de la Convención Ramsar, los Pantanos de Villa son un humedal del tipo marino – costero.

4.1.2. Características biofísicas

Los humedales costeros son ecosistemas ubicados en la cuenca baja de los valles costeros, surgen debido a la infiltración y afloramiento de las aguas subterráneas.

Fisiografía: Está definida por un relieve plano a ligeramente ondulado con depresiones. Por el norte, los Humedales de Villa están limitados por el cerro Morro Solar y por el este por colinas de baja altura. Su altitud media es de 5 m aproximadamente.

Hidrología: Hidrográficamente se encuentre en el vértice SO del cono deyectivo del Río Rímac. Los Humedales de Villa están integrados al sistema hidrológico de la cuenca del río Rímac, a través del acuífero Ate-Surco-Chorrillos.

Calidad de Agua: El agua de los Humedales de Villa es salobre, aumentando la salinidad cerca al litoral. La concentración promedio de sales registrada es de 1,6400 ppt. Su pH es ligeramente básico con valores promedio que fluctúan durante el año entre 7,33 - 7,8.

Clima: La temperatura media anual es de 18.6 grados centígrados, fluctuando la humedad relativa entre el 85 y 99 %. La precipitación es escasa, alcanzando un promedio de 60 mm al año.

Ecología: En el mapa ecológico del Perú (ONERN 1976), están ubicados en el desierto desecado subtropical. La distribución heterogénea en áreas circundantes muestra gran diversidad de hábitats, con diferentes tipos de sustrato de fondo (superficies pedregosas, arenosas, sedimentos fangosos, etc.), así como por la calidad de agua que ha permitido la colonización de diversas poblaciones algales. La complejidad ecológica de la laguna de Villa con diversas comunidades algales e interacciones específicas está relacionada con el estado trófico de sus aguas superficiales.

Flora: El Plan Maestro “Pantanos de Villa, refugio de vida silvestre” (1998) distingue cuatro asociaciones vegetales: Totorales, Zona arbustiva, Vega de ciperáceas y Gramadales



Figura 9: Vista satelital del área de estudio
Proyección UTM Zona: 18S Datum: WGS84
Fuente: Elaboración Propia

MAPA: UBICACIÓN DE RVSPV



Figura 10: Mapa de ubicación de la Reserva de Vida Silvestre los Pantanos de Villa

4.2. Diseño de Investigación

Para determinar el Diseño, Tipo y Nivel de una investigación existen muchos esquemas planteados por diversos autores, en nuestro trabajo seguimos los lineamientos propuestos por Carrasco Díaz S. (2014).

El diseño es no experimental debido a que no se manipulan las variables a emplear y los hechos y fenómenos de la realidad se estudian después de su ocurrencia.

También es del tipo transversal porque analizamos la realidad en un momento determinado de tiempo, en nuestro estudio, empleamos imágenes de una determinada estación del año (verano 2016).

Además, es de tipo correlacional debido a que busca establecer una relación entre las variables para un determinado contexto y tiempo; en nuestro estudio se intenta establecer una relación entre la concentración de clorofila-a y la información espectral de las bandas satelitales.

4.2.1. Tipo de investigación

La investigación es de tipo aplicada, porque tiene un objetivo claro y definido: la estimación de clorofila-a de un humedal costero mediante el uso de imágenes satelitales, con aportes científicos de la teledetección, bioquímica, y estadística. Para realizar esto, se realizan varios procesos matemáticos y estadísticos, lo cual permite generar modelos de regresión lineal, los cuales a su vez permiten realizar mapas de concentración sobre todo el cuerpo de agua mediante extrapolaciones para obtener datos estimados de la zona de estudio. Es decir, un producto de valor agregado obtenido de los datos satelitales apoyado en mediciones de campo.

4.2.2. Nivel de investigación

La investigación es de nivel explicativo por que busca explicar la concentración de clorofila-a estimada en función de valores radiométricos de los píxeles de una imagen satelital multiespectral, así también explica los efectos de los diferentes tipos de imágenes satelitales empleados en las diferentes etapas del proceso realizado.

4.2.3. Enfoque de la investigación

De acuerdo con Hernández Sampieri, R., Mendoza Torres C. (2018), se ha determinado el enfoque de la presente investigación.

Es cuantitativo, desde la perspectiva de la teledetección porque tiene la finalidad de dimensionar el área del cuerpo de agua y estimar la concentración superficial de clorofila A; asimismo es cuantitativa desde la perspectiva de la bioquímica porque se determinó la concentración de la clorofila A en laboratorio. También, desde la perspectiva de la estadística busca generar modelos de correlación lineal que permite cuantificar la concentración de clorofila A.

UNIDAD DE ANÁLISIS	UNIDAD DE OBSERVACIÓN	UNIDAD DE INFORMACIÓN
Laguna Mayor de los Pantanos de Villa	Sensores Remotos (Teledetección)	Imágenes de satélite para observar y medir las propiedades del agua de los humedales, como la reflectancia espectral, que permiten estimar la concentración de clorofila-A
	Muestreo de Agua	Muestras de agua en diversas ubicaciones geográficas para analizar la concentración de Clorofila-A.

Tabla 6: Unidades de análisis observación e información

4.3. Población y Muestra

Para el trabajo de campo se planifico la toma de 10 muestras del agua superficial para su posterior análisis en laboratorio. Este muestreo fue escogido debido a la distribución de la clorofila, donde las zonas cercanas a los bordes contienen mayor concentración y por el limitado acceso (Figura 15).



Figura 11: Mapa de puntos de muestreo Laguna Mayor de los Humedales de Villa
Fuente: Elaboración Propia

Procedimiento, técnicas e instrumentos de recolección de información

4.3.1. Determinación de la concentración de Clorofila-a mediante análisis de laboratorio

Uno de los procedimientos más útiles para el análisis de pigmentos fotosintéticos, como la clorofila y sus derivados es la Espectrofotometría, la cual se usa directamente en la cuantificación de muestras que contienen mezcla de pigmentos basándose en diferentes ecuaciones y coeficientes asociados por cada tipo de pigmento; se puede usar un solo coeficiente de extinción (es decir, monocromático) o emplear varios coeficientes (por ejemplo, tricromático) para minimizar la distorsión generada por el solapamiento de espectros de absorción.

Este método es más asequible y ampliamente utilizado (Picazo et al., 2013), como se evidencia en el análisis comparativo de métodos espectrofotométricos empleados para la determinación de los pigmentos basado en el total de citaciones durante el periodo 1960-2010 de acuerdo a los datos de ISI -Thomson Reuters, Web of Knowledge. (Figura 14)

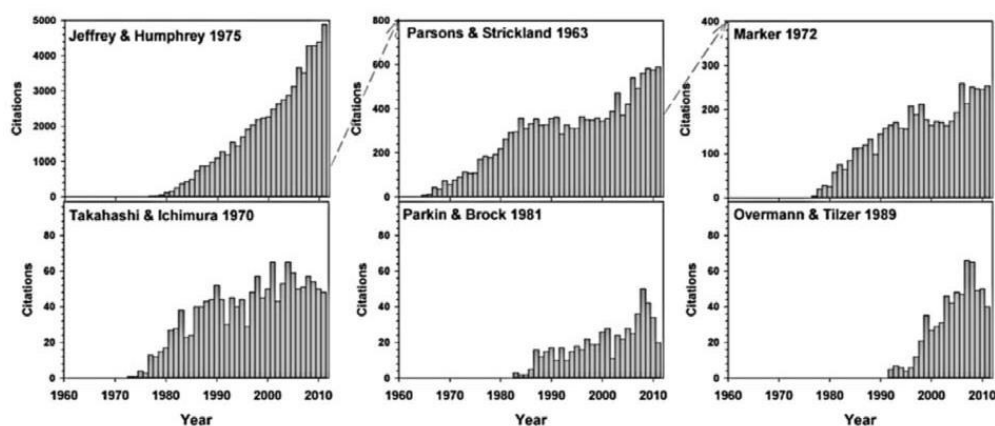


Figura 12: Comparativa de métodos espectrofotométricos más usados.

Fuente: Picazo et al. (2013)

De lo indicado en los gráficos se evidencia que el método más citado es el propuesto por **Jeffrey y Humphrey** en 1975 (más de 5000 citaciones en los últimos 50 años). Además, este método es ampliamente utilizado internacionalmente en la determinación espectrofotométrica de los pigmentos fotosintéticos por las agencias de gestión responsables de controlar la calidad del agua, por ejemplo, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), ha desarrollado el método 446.0 (**Arar, 1997**) el cual está basado en esta metodología. Adicionalmente, para el caso de nuestro estudio y análisis de muestras, el método de Jeffrey y

Humphrey fue recomendado por el ingeniero Jesús Ledesma del IMARPE.

4.3.1.1. Materiales

Para la conservación de las muestras de campo:

- Papel aluminio
- Hielo
- Cooler
- Congeladora

Para el análisis de las muestras en laboratorio, el método requiere el uso de los siguientes materiales:

- Papel Papel filtro Whatman (25 mm diámetro)
- Pinza
- Probeta
- Embudo de filtración magnética
- Sonic Vibra Cell
- Acetona 90 %
- Centrifuga de laboratorio

4.3.1.2. Recolección de datos

El procedimiento para el muestreo consiste en: Tomar una muestra de agua en una botella de plástico, luego de ser obtenida cada muestra inmediatamente se cubrió con papel aluminio, luego con un plástico o bolsa negra se forró totalmente. Este paso tiene por finalidad impedir el contacto con la luz solar y así evitar posteriores errores en la medición; seguidamente las muestras se colocaron en un cooler con hielo para preservar las muestras y no alterarlas (Fotografía 1); finalmente fueron transportadas en el menor tiempo posible al laboratorio para realizar el análisis.



Fotografía 1: Conservación muestras

4.3.1.3. Metodología

En nuestro estudio emplearemos el método espectrofotométrico para conocer la absorbancia de las muestras in-situ

De entre los métodos existentes emplearemos el de Jeffrey y Humphrey originalmente desarrollado en 1975, es un conjunto de ecuaciones que permiten determinar la concentración de diversos pigmentos fotosintéticos, como por ejemplo la clorofila-a.

El pigmento se puede extraer de las células utilizando disolventes orgánicos tales como acetona, metanol, etanol; en una comparativa entre los mencionados, la acetona demostró generar picos de absorción más identificables o nítidos (Raymond Ritchie, 2006). Por ello en nuestro trabajo se emplea acetona al 90% como solvente. Otro estudio indica que el pigmento de recuperación se puede mejorar gracias al uso de sonicación (Schagerl & Künzl, 2007).

Las mediciones de absorbancia se hacen en el rango de longitudes de onda donde se espera que absorba el analito (sustancia a analizar), también es necesario comparar la muestra objetivo con una muestra estándar de referencia. Esta debe poseer una absorbancia de cero que equivale a una transmitancia 100. En nuestro caso para la clorofila-a, teóricamente esta absorbancia se encuentra en los 750 nm. Por tanto, se requieren mediciones en el rango de los 630 a 750 nm es decir en el rango visible.

Además, es conveniente realizar una curva espectral en la cual grafique la absorbancia del analito, en las distintas longitudes de onda.

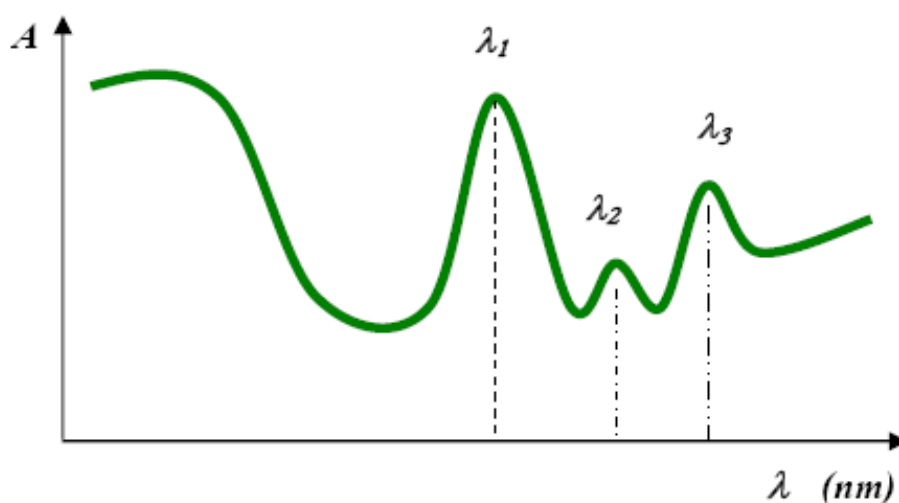


Figura 13: Curva Espectral de absorbancia

Pasos a seguir:

- Lectura de la absorbancia en el espectrofotómetro. Lectura de cada muestra en las longitudes de onda descritas.
- Volúmenes filtrados y utilizados en los tubos para el centrifugado
- Luego se procede a obtener los valores de absorbancia eliminando el componente de la turbidez, el cual se calcula empleando la banda de 750 nm, por ello el valor de absorbancia se obtuvo mediante la siguiente formula:

$$\text{Absorbancia sin turbidez } (\lambda) = \text{Lectura turbia } (\lambda) - \text{Lectura turbia 750 nm}$$

Para el cálculo de la **Clorofila – A**, se empleará la ecuación propuesta por Jeffrey y Humphrey (1975) La ecuación tiene como unidades de salida, microgramos por litro ($\mu\text{g/L}$) y es la siguiente:

$$\text{Chl a} = 11.85 * A_{664} - 1.54 * A_{647} - 0.08 * A_{630} * \left(\frac{v}{V * d}\right)$$

Donde:

Chla: Concentración de Clorofila-A en microgramos por litro

A664: Lectura de absorbancia sin turbidez a 664 nm

A647: Lectura de absorbancia sin turbidez a 647 nm

A630: Lectura de absorbancia sin turbidez a 630 nm

v: Volumen de acetona añadido para la extracción

V: Volumen total de agua filtrado para la extracción

d: Diámetro de la cubeta

4.3.1.4. Flujograma

El procedimiento para el muestreo se puede resumir en el siguiente diagrama de flujo:

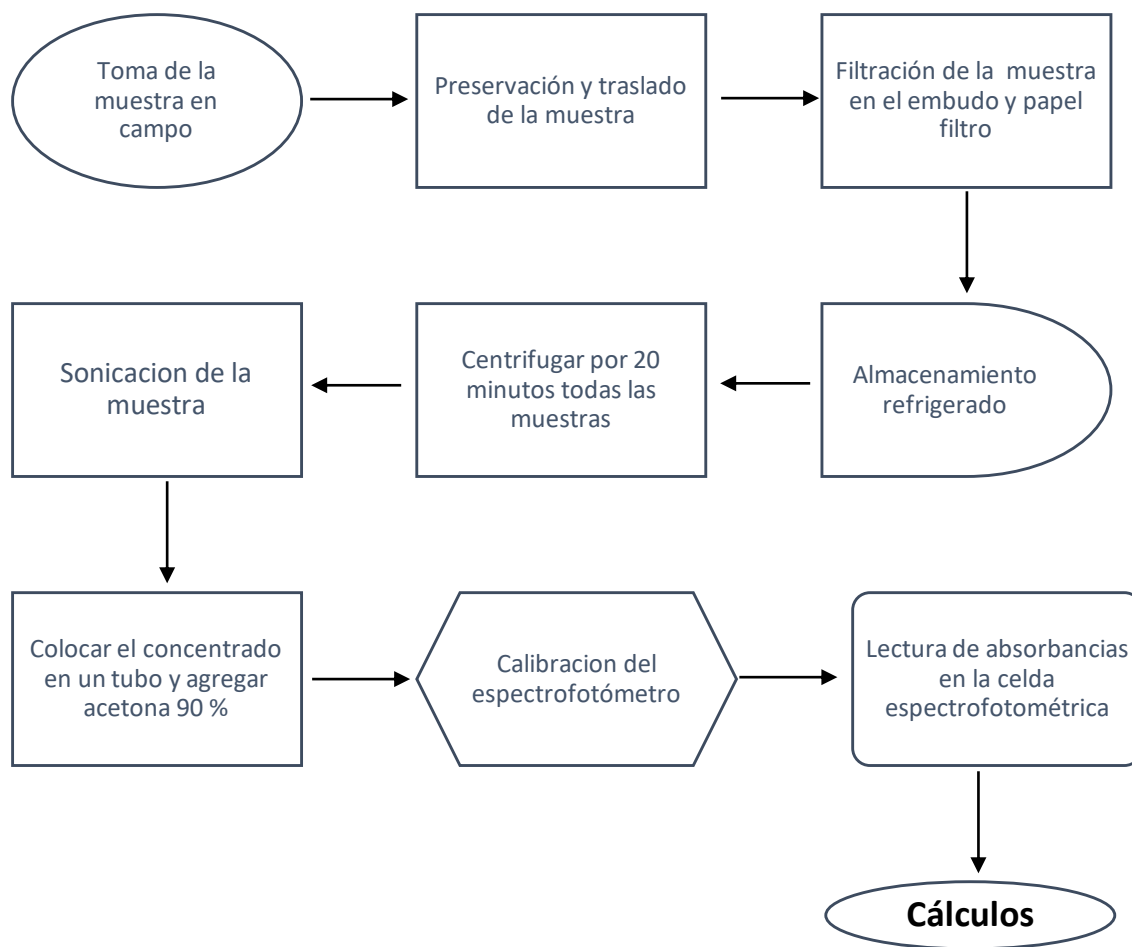


Figura 14: Flujograma de cálculos de laboratorio.

Fuente: Elaboración Propia

4.3.2. Estimación de la Clorofila-a mediante teledetección

4.3.2.1. Materiales

El desarrollo de esta etapa requiere insumos de información geoespacial digital que se puede agrupar en datos raster y datos vectoriales, además para su adecuada explotación y análisis se emplea software especializado.

Datos raster

Los datos raster empleados se componen de las imágenes satelitales multiespectrales y modelos de elevación digital

Imagen	Fecha toma	Nivel de procesamiento	ID del Producto
SPOT	2016-03-20	L1B	DS_SPOT7_201603201507411_PS1_PS1_PS1_PS1_W077S12_01140
Landsat 8	2016-03-20	L1TP	LC80070692016080LGN01

Tabla 7: Datos raster empleados

Datos vectoriales

Para definir el área de estudio se empleó información oficial como:

Perímetro de la RVSPV: Obtenida en base a los puntos limítrofes indicadas en la RM 0144-89-AG/DGFF, estos datos poseen datum PSAD 56, por lo que se deben convertir a WGS84.

Límites de los Humedales Costeros: Obtenidos del Mapa Nacional de Ecosistemas del MINAM ()

La selección del área de estudio en el ámbito de los SIG se realizó mediante los siguientes datos vectoriales digitales:

- Límite de la Reserva de Vida Silvestre: Obtenido en base a la Memoria Descriptiva de DS-055-2006-AG, donde se indican los vértices del perímetro de la Reserva, estos puntos están indicados en coordenadas del Datum PSAD 56, por ello mediante el software ArcGIS se realizó la conversión al Datum WGS 84, empleando la ecuación de conversión más apropiada (PSAD_1956_To_WGS_1984_8)
- Límite del humedal generado en el Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú (2019) por el MINAM. Archivo vectorial denominado: *hcosteros_pantanosdevilla*.

Datos de Campo

Ficha Técnica de Firma Espectral de agua en el Humedal de Villa proporcionada por el Grupo de Investigación CTCLIMA-FCF-UNMSM (Anexo I)

Software

Los Software ENVI y Geomatica Banff fueron empleados para la visualización de las imágenes satelital y para realizar el procesamiento de las mismas.

El software ArcGIS Pro fue empleado como Sistema de Información Geográfica base sobre el cual integrar los datos geoespaciales y además realizar las operaciones geoespaciales necesarias para el proyecto

Para el análisis estadístico se emplearon el lenguaje de programación R y el intérprete estadístico RStudio.

4.3.2.2. Metodología

Consideraciones cartográficas

El primer punto a considerar son los aspectos cartográficos, ya que estos determinaran la precisión posicional máxima permitida en el estudio, para este punto se consideró lo planteado inicialmente por Lencinas y Sievert (2009), donde se analiza la relación entre la resolución espacial de sensores remotos y la escala cartográfica, detallando así parámetros cartográficos como las escalas de trabajo y Mínima Unidad de Cartografiado (MUC). Posteriormente este trabajo fue actualizado por Marquina y Mogollón (2018) con la inclusión de nuevos satélites para realizar un correcto levantamiento de información obtenida en base a Teledetección, las escalas recomendadas para los satélites SPOT son:

Datos Satelitales	Resolución Espacial (m)	Escala Cartográfica Máxima	Precisión Planimétrica 0,5 mm (90 %)	MUC en área (5*5 mm ²)	MUC Lineal (1 mm)
Landsat 8	15 m	1:30000	15 m	0,2 ha	30 m
SPOT 6 & 7	6 m	1:12000	6,0 m	0,3 ha	12 m

Tabla 8: Escalas y nivel de detalle asociado por imagen

Por otro lado, el ANA (2018) realizó un Estudio piloto para el inventariado de humedales empleado imágenes Landsat 8 y define como MUC el valor de 3 x 3 píxeles lo cual es equivalente a una MUC de 0.2 ha.

Por tanto, en este trabajo se considerará 0.2 ha como MUC en las etapas en las que se proceda a cartografiar datos raster.

Diagrama de flujo general

Una vez definida la escala máxima de trabajo, se procederá al estructurar los datos los cuales son de 2 tipos principales: datos obtenidos in situ y datos geoespaciales (Imágenes satelitales y datos vectoriales), las distintas etapas de la metodología se pueden representar como un diagrama de flujo en el cual se detallan las diversas etapas del estudio:

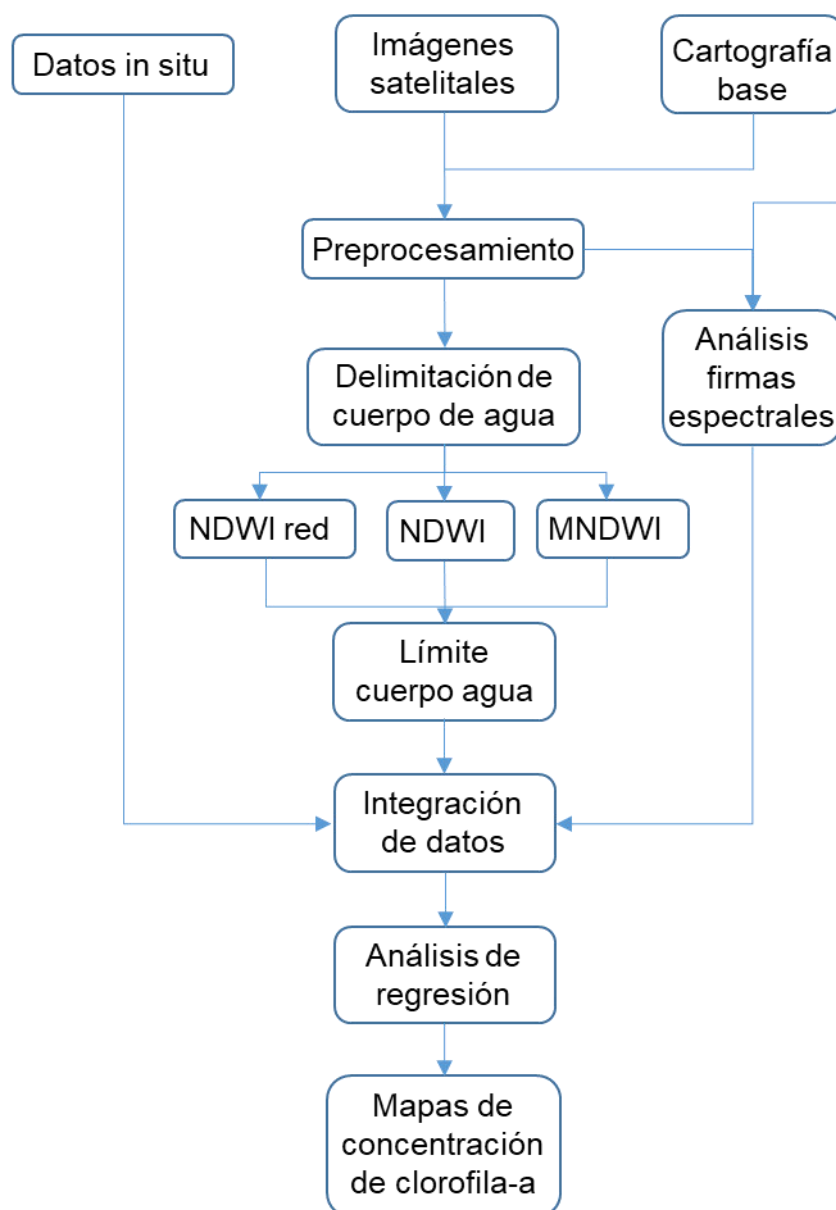


Figura 15: Diagrama de flujo de la metodología general

Fuente: Elaboración propia

4.3.2.3. Preprocesamiento de las imágenes satelitales

Consiste en realizar operaciones en los datos satelitales a fin de que puedan estar sobre un mismo marco de referencia, tanto geométrico como en su valor radiométrico, se sigue el esquema descrito en la figura 19

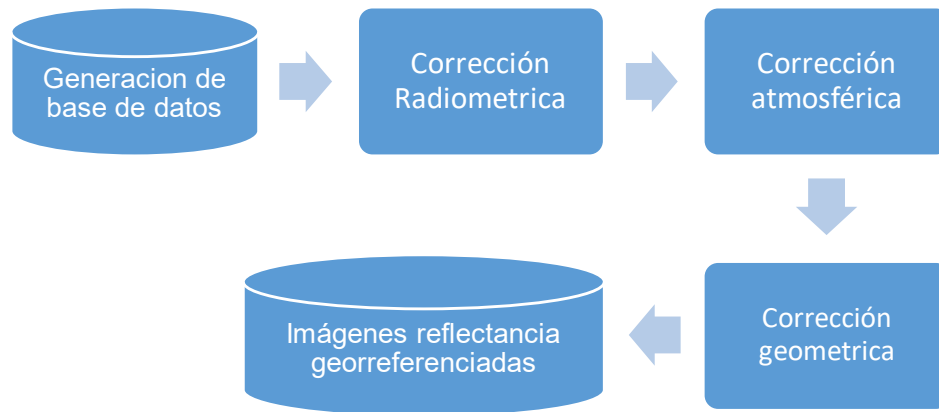


Figura 16: Flujo de trabajo de preprocesamiento.

Fuente: Elaboración Propia

Corrección Radiométrica

El proceso seguido para la corrección radiométrica de la imagen satelital del sensor Multiespectral (MS) fue el siguiente:

- Conversión para los satélites SPOT 7

La ecuación está indicada en el manual de usuario (SPOT 6 & SPOT 7 Imagery User Guide 2013), y se emplean las constantes de calibración que se encuentran en los metadatos de cada imagen satelital

$$L_b(p) = \frac{ND(p)}{GAIN(b)} + BIAS(b)$$

Dónde:

$L_b(p)$: Radiancia espectral en el techo de la atmósfera (W/ m2.sr. μm)

$GAIN(b)$: Valor multiplicativo

$BIAS(b)$: Factor aditivo

Luego se procede a calcular la reflectancia en el tope de la atmosfera (TOA), empleando la siguiente formula:

$$\rho_b(p) = \frac{\pi \cdot L_b(p)}{E_0(b) \cdot \cos(\theta_s)}$$

Dónde:

$E_0(b)$: Irradiancia solar en el TOA en W/ m2.sr. μm

θ_s : Angulo solar cenital (90° - ángulo elevación solar)

Corrección Atmosférica

En esta etapa se procedió a calcular la reflectancia superficial mediante dos métodos distintos

El primero fue el proceso de corrección atmosférica DOS el cual requiere identificar objetos oscuros en una imagen, calcular la cantidad de radiación atmosférica presente en cada banda espectral y luego restar esta radiación de los valores de reflectancia de todos los píxeles en la imagen. El resultado es una imagen corregida que representa de manera las características de la superficie terrestre sin los efectos atmosféricos no deseados.

También se empleó en paralelo el modelo ATCOR desarrollado por la DLR y disponible en el software Geomatica Focus, se indicaron parámetros necesarios para la ejecución del modelo como: escenarios atmosféricos predefinidos (Marítimo y Urbano), condiciones de altitud (5 m) y ángulo cenital solar (extraído de la metadata de cada imagen) a fin de evaluar cuál de ellos es más adecuado para nuestra área de estudio.

Corrección Geométrica

Para la corrección geométrica de la imagen satelital SPOT se empleó el método de los Coeficientes Racionales Polinomiales (RPC, por sus siglas en inglés), los cuales representan un modelo matemático de la geometría de la imagen, en forma de un conjunto de coeficientes polinomiales racionales, que se puede usar para ortorectificar la imagen. Este procedimiento también requiere un Modelo de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés). Con frecuencia se puede mejorar el ajuste del modelo polinomial racional a una imagen particular mediante la re-georreferenciación de la imagen utilizando puntos precisos de control terrestre (GCP, por sus siglas en inglés).

Para el caso específico de imágenes SPOT se emplea el modelo de coeficientes polinomiales racionales (RPC) el cual combina transformaciones lineales y cuadráticas para proporcionar una relación entre:

- Coordenadas de la imagen + altitud y coordenadas de terreno (modelo directo: Imagen -> Terreno)
- Coordenadas de terreno + altitud y coordenadas de imagen (modelo inverso: Terreno -> Imagen)

Las coordenadas de terreno (longitud, latitud) utilizadas por modelo inverso o calculadas por modelo directo están en el sistema geodésico WGS84, la "altitud" utilizada es una altura por encima del elipsoide. En nuestro caso emplearemos el algoritmo directo.

Todos los datos necesarios para el uso del algoritmo directo se encuentran en el archivo RPC en los metadatos de la imagen (RPC_*.xml)

Todas las coordenadas deben estar normalizadas hacia el centro es decir el origen del sistema de coordenadas de la imagen debe ser el centro de la imagen, para ello empleamos el algoritmo de localización directa.

Al usar el modelo directo (de imagen a terreno), se ingresan las coordenadas de imagen (col, lin) y altitud (alt). Los resultados al aplicar el modelo son coordenadas geográficas (longitud, latitud). Las etapas son las siguientes:

Transformación de las coordenadas de la imagen en coordenadas de imagen centro - normalizadas:

$$col_{CN} = \frac{col - SAMP_{OFF}}{SAMP_SCALE}$$

$$lin_{CN} = \frac{lin - LINE_{OFF}}{LINE_SCALE}$$

Transformar la coordenada de altitud en coordenadas de altitud centro - normalizadas:

$$alt_{CN} = \frac{alt - HEIGHT_{OFF}}{HEIGHT_SCALE}$$

Para el modelo directo, las ecuaciones polinomiales de función racional para latitud y longitud centro-normalizadas, es decir con origen de coordenadas en el centro de la imagen, se definen como:

$$lon_{CN} = \frac{\sum_{i=1}^{20} SAMP_NUM_COEFF_i \times \rho_i(lin_{CN}, col_{CN}, alt_{CN})}{\sum_{i=1}^{20} SAMP_DEN_COEFF_i \times \rho_i(lin_{CN}, col_{CN}, alt_{CN})}$$

$$lat_{CN} = \frac{\sum_{i=1}^{20} LINE_NUM_COEFF_i \times \rho_i(lin_{CN}, col_{CN}, alt_{CN})}{\sum_{i=1}^{20} LINE_DEN_COEFF_i \times \rho_i(lin_{CN}, col_{CN}, alt_{CN})}$$

Los numeradores y denominadores de las ecuaciones polinomiales de función racional son funciones polinomiales cúbicas de 20 términos de la forma:

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^{20} C_i \times \rho_i(\text{lin}_{CN}, \text{col}_{CN}, \text{alt}_{CN}) \\
&= C_1 + C_6 \times \text{col}_{CN} \times \text{alt}_{CN} + C_{11} \times \text{lin}_{CN} \times \text{col}_{CN} \\
&\quad \times \text{alt}_{CN} + C_{16} \times \text{lin}_{CN}^3 + C_2 \times \text{col}_{CN} + C_7 \times \text{lin}_{CN} \\
&\quad \times \text{alt}_{CN} + C_{12} \times \text{col}_{CN}^3 + C_{17} \times \text{lin}_{CN} \times \text{alt}_{CN}^2 + C_3 \\
&\quad \times \text{lin}_{CN} + C_8 \times \text{col}_{CN}^2 + C_{13} \times \text{col}_{CN} \times \text{lin}_{CN}^2 + C_{18} \\
&\quad \times \text{col}_{CN}^2 \times \text{alt}_{CN} + C_4 \times \text{alt}_{CN} + C_9 \times \text{lin}_{CN}^2 + C_{14} \\
&\quad \times \text{col}_{CN} \times \text{alt}_{CN}^2 + C_{19} \times \text{lin}_{CN}^2 \times \text{alt}_{CN} + C_5 \times \text{col}_{CN} \\
&\quad \times \text{lin}_{CN} + C_{10} \times \text{alt}_{CN}^2 + C_{15} \times \text{col}_{CN}^2 \times \text{lin}_{CN} + C_{17} \\
&\quad \times \text{alt}_{CN}^3
\end{aligned}$$

Donde los coeficientes C_1 al C_{20} representan los siguientes conjuntos de coeficientes:

SAMP_NUM_COEF_n, SAMP_DEN_COEF_n,
LINE_NUM_COEF_n, LINE_DEN_COEF_n, los cuales pueden ser encontrados en el grupo "RFM_Vailidity" en el archivo RPC de la imagen SPOT de nivel SENSOR.

Luego es necesario realizar la transformación de las coordenadas del terreno centro-normalizadas en coordenadas del terreno con coordenadas geográficas:

$$\text{lon} = \text{lon}_{CN} * \text{LONG_SCALE} + \text{LONG_OFF}$$

$$\text{lat} = \text{lat}_{CN} * \text{LAT_SCALE} + \text{LAT_OFF}$$

Donde los valores LONG_SCALE, LONG_OFF, LAT_SCALE, LAT_OFF se encuentran en el archivo RPC asociado.

En la generación de la imagen ortorectificada se emplearon los siguientes parámetros:

Corrección mediante RPC, método directo

Modelo de elevación base: DEM SRTM 30 m, ID: S13W078
(disponible gratuitamente en <https://earthexplorer.usgs.gov/>)

- Tipo de archivo: Entero (16 bits)
- Numero de bandas: 4 (multiespectral)
- Referencia de elevación del DEM base: Nivel medio del mar
- Intervalo de remuestreo: 1
- Tipo de Remuestreo: Cubico

4.3.2.4. Análisis de Firmas Espectrales

Es importante determinar la calidad de las imágenes de reflectancia obtenidas. Se realizará una comparación de las firmas espectrales de esta manera podremos analizar los resultados obtenidos de las imágenes de reflectancia y seleccionar las imágenes más apropiadas para continuar el proceso.

El patrón de comparación será la firma espectral obtenidas por el Grupo de Investigación CTCLIMA-FCF-UNMSM

4.3.2.5. Delimitación de cuerpo de agua

Antes de realizar la estimación de clorofila-a sobre el cuerpo de agua es necesario determinar el límite de dicho cuerpo es decir discriminar las superficies con presencia de agua superficial de las que no tienen, a fin de realizar el cálculo solo en dichas áreas. Se han desarrollado varios métodos diferentes para la extracción/delineación de masas de agua en datos de detección remota, pudiendo usarse métodos ópticos como índices de agua o métodos basados en imágenes radar como los umbrales de retrodispersión.

El flujo específico es el siguiente:

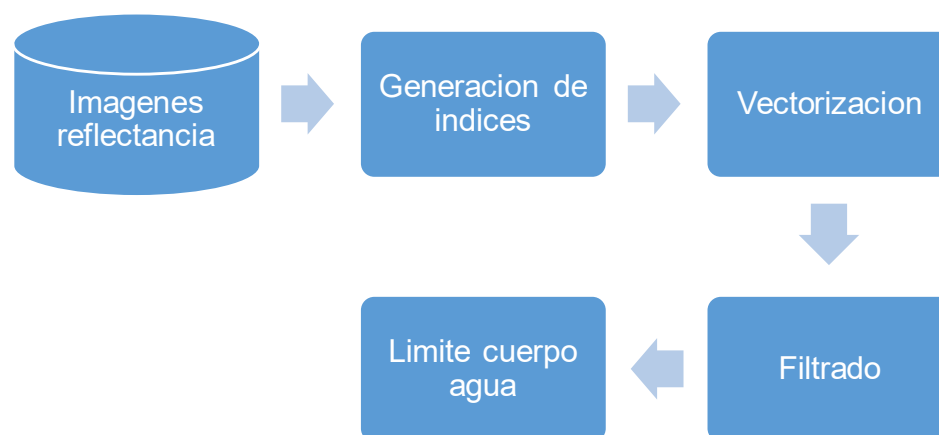


Figura 17: Flujograma de Delimitación de cuerpo de agua
Fuente: Elaboración Propia

Generación de índices

En este trabajo emplearemos índices de bandas espectrales de imágenes ópticas como: el NDWI de Mc Feeters, el MDNWI de Gao, y el NDWI de Xu el cual emplea las bandas roja e infrarroja por ello también es conocido como NDWI-red.

Filtrado Cartográfico

En esta etapa se emplean los parámetros cartográficos descritos anteriormente, es decir, se consideran como MUC a 0.2 ha, por tanto, polígonos con áreas menores son eliminados de la base de datos.

4.3.2.6. Integración de datos

Superposición de capas

Luego de obtener las imágenes en valores de reflectancia y corregidos geométricamente, se procederá a superponer los datos con las posiciones obtenidas mediante el receptor geodésico y la del pixel.

Extracción de datos

La data se extraerá mediante la técnica “Píxeles individuales”, ya que la precisión de las coordenadas del receptor geodésico es menor que el valor del píxel en la imagen.

Luego se emplea la herramienta *Sample* (Muestra) del software ArcGIS para poder extraer los valores (píxeles) de cada raster que se superponen espacialmente con los puntos de muestreo.

4.3.2.7. Correlación entre concentración de Clorofila-a e imágenes satelitales

Para esta finalidad se pueden emplear métodos empíricos o analíticos los cuales se basan en las relaciones entre datos satelitales y mediciones de campo.

Los métodos empíricos utilizan regresiones estadísticas para proporcionar un mejor ajuste entre datos y mediciones de campo. Se busca obtener la mejor correlación entre las mediciones in situ y los datos de detección remota solamente basada en estimación estadística; no se considera ninguna propiedad óptica física o principal de agua, como IOP o AOP. Por otro lado, los métodos analíticos consideran propiedades físicas de los componentes como las IOP y sus características espectrales.

En esta investigación hemos considerado emplear métodos empíricos. Por tanto, se buscara encontrar relaciones entre los

parámetros de calidad del agua y los valores espectrales (banda individual, combinaciones de bandas o proporción de bandas) mediante cálculos relacionados con la regresión.

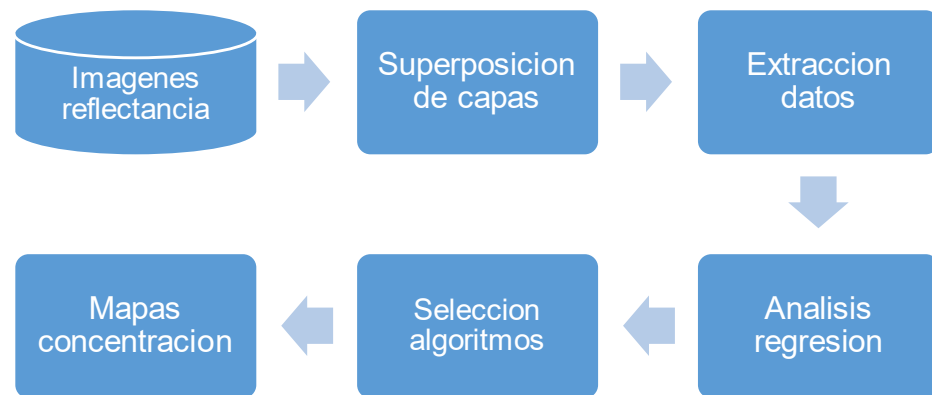


Figura 18: Flujo de trabajo para correlación.

Fuente: Elaboración Propia

Consiste en realizar operaciones matemáticas entre los valores extraídos de las bandas satelitales. La literatura revisada en el ámbito de la Teledetección emplea ampliamente esta clase de operaciones para buscar correlaciones estadísticas entre la concentración de clorofila en cuerpos de agua tomada in situ.

Según lo desarrollado por Chang et al., (2009), las técnicas estadísticas tradicionales proporcionan regresiones lineales o múltiples lineales entre los parámetros medidos de calidad del agua y los datos de detección remota. En regresiones lineales múltiples, los parámetros de calidad del agua medidos se consideran variables dependientes, mientras que los valores espectrales de diferentes bandas se consideran variables independientes. La detección de cambios multitemporales con datos de detección remota a través de las regresiones lineales múltiples puede mejorar el potencial del monitoreo de la calidad del agua. Sin embargo, los resultados de los modelos de regresión lineal no son confiables en cuerpos de agua con concentraciones altas o bajas de parámetros de calidad del agua, como áreas costeras poco profundas o cuerpos de agua continentales, respectivamente (Chang et al., 2012; Liu et al., 2003). Los modelos empíricos desarrollados para un cuerpo de agua específico pueden no ser totalmente transferibles a otros cuerpos de agua; sin embargo, una ventaja importante es que integran características únicas del cuerpo de agua en el modelo resultante y, en consecuencia, tienen un mayor poder explicativo para estimar las condiciones de calidad del agua que un modelo analítico general. Sin embargo, esta ventaja también presenta una

limitación aparente porque la precisión del modelo empírico puede degradarse cuando se aplica a aguas superficiales con diferentes tipos de constituyentes químicos en diferentes entornos. Por lo tanto, los algoritmos empíricos funcionan mejor cuando se aplican al sitio donde se recolectaron los datos de muestreo y se derivaron las fórmulas (Liu et al., 2003; Reif, 2011), lo que hace que los algoritmos empíricos sean útiles para monitorear cuerpos de agua locales para municipios

Se usan varios algoritmos empíricos para relacionar la concentración de clorofila con la reflectividad del océano a una multiplicidad de longitudes de onda en la región de 0,43 a 0,8 μm . - O'Reilly et al. (1998) dan un resumen de los algoritmos más recientes y una comparación de su rendimiento. Las técnicas estadísticas tradicionales proporcionan regresiones lineales o múltiples lineales entre los parámetros medidos de calidad del agua y los datos de detección remota (Chang et al., 2009). En regresiones lineales múltiples, los parámetros de calidad del agua medidos se consideran variables dependientes, mientras que los valores espectrales de diferentes bandas se consideran variables independientes. La detección de cambios multitemporales con datos de detección remota a través de las regresiones lineales múltiples puede mejorar el potencial del monitoreo de la calidad del agua. Sin embargo, los resultados de los modelos de regresión lineal no son confiables en cuerpos de agua con concentraciones altas o bajas de parámetros de calidad del agua, como áreas costeras poco profundas o cuerpos de agua continentales, respectivamente (Chang et al., 2012; Liu et al., 2003). Los modelos empíricos desarrollados para un cuerpo de agua específico pueden no ser totalmente compatibles en otros cuerpos de agua; sin embargo, una ventaja importante es que integran características únicas del cuerpo de agua en el modelo resultante y, por tanto pueden generar modelos más cercanos a la realidad que un modelo analítico general. Sin embargo, esta ventaja también presenta una limitación aparente porque la precisión del modelo empírico puede degradarse cuando se aplica a aguas superficiales con diferentes tipos de constituyentes químicos en diferentes entornos. Por lo tanto, los algoritmos empíricos funcionan mejor cuando se aplican al sitio donde se recolectaron los datos de muestreo y se derivaron las fórmulas (Liu et al., 2003; Reif, 2011), lo que hace que los algoritmos empíricos sean útiles para monitorear cuerpos de agua locales

Durante los últimos 25 años se han publicado diversos artículos científicos (Baban, Yang, Duan Ekercin, Torbick) donde se presentan ecuaciones empíricas que permiten estimar la concentración de clorofila-a basada en imágenes de satélites ópticos con diversas combinaciones de bandas disponibles.

Para este estudio se ha elaborado una síntesis de satélites con bandas similares al satélite SPOT, donde se detalla el autor, el satélite y bandas empleados, la ecuación y su coeficiente de correlación; lo cual se encuentra en la siguiente tabla:

Referencia	Plataforma satelital	Bandas	Ecuación Clorofila-a ($\mu\text{g l}^{-1}$)	R ²
Baban 1997	Landsat 5 (TM)	TM3, TM1	$-770+4768 (TM3/TM1)-24.6 (TM2+TM3)/2$	0.74
Yang 1999	SPOT	NIR/RED	$9.37+10.10\ln XS3/XS2$	0.95
Duan 2007	Landsat 5 (TM)	X=TM4/TM3	$93.67x - 90.40$	0.69
Ekercin 2007	IKONOS	NIR R G B	$1.0436x - 0.6309$	0.99
Torbick 2008	Landsat 7 (ETM+)	Red Blue	$\ln Chl.=5.001(ETM+3/ETM+1)-1.855$	0.81
Alarcón 2018	Landsat 8 (OLI)	Blue NIR	$5749.5*B5-9951.1*B2+128.7$	0.89
		Red NIR	$101.03 * B5/B4 - 48.04$	0.87

Tabla 9: Principales ecuaciones para estimación de clorofila-a

Landsat TM: TM1 (Blue-green), TM2 (Green), TM3 (Red), TM4 (Near infrared)

Landsat ETM+: ETM+1, ETM+2, ETM+3

SPOT: XS1 (Green), XS2 (Red), XS3 (Near infrared)

IKONOS: B (Blue), G (Green), R (Red), NIR (Near infrared)

4.3.2.8. Generación de mapas de concentración de clorofila

Una vez seleccionado los algoritmos más adecuados, la siguiente etapa es la elaboración de mapas de concentración de clorofila, los pasos necesarios, para obtener mapas temáticos son:

Aplicación del modelo

Los modelos seleccionados se aplican sobre la zona de estudio, para obtener una imagen de concentración de clorofila-a en valores de tipo real (float)

$$Chl\ a = A (\text{Ratio Bandas}) + B$$

Reclasificación

Adicionalmente es posible categorizar los valores de concentración de clorofila-a en el cuerpo de agua tomando como referencia el Índice de Estado Trófico (TSI), para ello se genera un nuevo ráster.

$$TSI_{(Clorofila)} = 10 \times \left(2.46 + \frac{\ln Chla}{\ln 2.5} \right) \frac{mg}{m^3}$$

Posteriormente se agrupan los valores de TSI resultantes en cuatro categorías de nivel trófico:

Nivel Trófico	TSI
Oligotrófico	Menor a 30
Mesotrófico	Menor a 30 menor a 60
Eutrófico	Mayor a 60 menor a 90
Hipereutrófico	Mayor a 90

Tabla 10: Principales ecuaciones desarrolladas para estimación de clorofila-a

4.4. Análisis estadístico

Se realizará un análisis de regresión, el cual consiste en comparar los valores obtenidos mediante el muestreo in situ con los valores de obtenidos en base a datos satelitales.

Los desafíos comunes de los métodos empíricos son encontrar relaciones entre los parámetros de calidad del agua y los valores espectrales (banda individual, combinaciones de bandas o proporción de bandas) mediante cálculos relacionados con la regresión.

Para construir un modelo que represente adecuadamente nuestro cuerpo de agua se procederá a superponer los puntos de muestreo en la imagen seleccionada, luego se realizaran análisis de regresión lineal simple para hallar una correlación entre los valores espectrales y la concentración de clorofila-a obtenida en laboratorio, en este caso se siguen los siguientes pasos:

- Construcción de modelos de regresión
- Selección de variables significativas

Para la selección de los mejores modelos se eligen todos aquellos con valor-p por debajo del umbral 0.05, y a su vez con un valor de R² mayor a 0.75.

No se realizarán regresiones lineales múltiples, ya que según lo recomendado en el libro de Mc Donald (2014) *Handbook of biological statistics* se debe tener como condición un mínimo de observaciones (muestras) en una proporción de 10 a 20 respecto al número de variables independientes (predictores) empleadas en el modelo.

El código desarrollado para la obtención de las variables estadísticas se puede encontrar en el anexo 4.

CAPÍTULO V

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Estimación de la Clorofila A por muestreo

5.1.1. Mediciones complementarias en los puntos de muestreo

Coordenadas en los puntos muestreo

Cada punto de muestreo fue debidamente identificado con coordenadas UTM (Proyección: UTM Zona: 18 S. Datum: WGS-84), estas coordenadas fueron obtenidas mediante un receptor geodésico tipo navegador (Marca Trimble Modelo Oregon 650). El conjunto de coordenadas para cada punto se indica al final de esta sección junto a los valores de clorofila-a obtenidos (Tabla 14).

Temperatura

El día en que se realizó la toma de datos la temperatura promedio en el área de estudio fue de 28 °C. (Fuente: SENAMHI).

5.1.2. Procedimiento Laboratorio

5.1.2.1. Toma de muestra

La extracción de las muestras se realizó de acuerdo a los lineamientos establecidos por el método 446.0 (**Arar, 1997**) de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos y con la asesoría del Ing. Jesus Ledesma Rivera del **Laboratorio de Hidroquímica y Productividad de la Unidad de investigación en Oceanografía Química y Geología Marina** del Instituto del Mar del Perú (IMARPE).



Fotografía 2: Ejemplo de Muestra tomada



Fotografía 3: Laguna Mayor de los Humedales de Villa

5.1.2.2. Almacenamiento y preservación

Las muestras luego de ser extraídas en campo, fueron cubiertas por completo con papel aluminio y bolsas negras colocadas dentro un cooler con hielo para conservar su estado químico y biológico. Luego fueron llevadas al Laboratorio de Hidroquímica y Productividad del IMARPE, el tiempo de transporte fue de 35 minutos aproximadamente luego de su extracción.



Fotografía 4: Preservación de las muestras

5.1.2.3. Análisis de laboratorio

Este análisis permitió extraer y homogeneizar las muestras de agua obtenidas (fotografía 5), para luego ser colocadas en un espectrofotómetro (fotografía 6) a fin de obtener los valores de absorbancia correspondiente a cada uno de ellos. El procedimiento de Laboratorio se encuentra detallado en el Anexo 3.

Fotografía 5: Muestras de agua

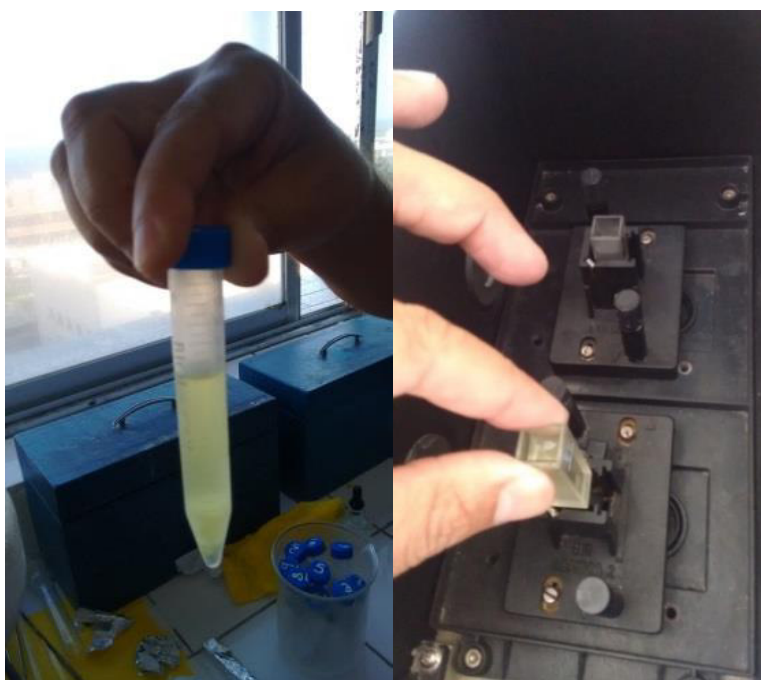


Fotografía 6: Espectrofotómetro Lambda 45 Perkin Elmer

5.1.2.4. Utilización del espectrofotómetro



Con ayuda de una pipeta se colocó un poco de cada muestra en la cubeta espectrofotométrica (fotografía 7)



Fotografía 7: Cubeta espectrofotométrica

5.1.3. Cálculos previos para la determinación de la Clorofila A

- Lectura de absorbancia en el espectrofotómetro para cada muestra en las longitudes de onda indicadas.

Estación	Fecha de Muestreo	Absorbancia con Turbidez			
		750	664	647	630
1	22/03/2016	0.0015	0.1659	0.0430	0.0311
2	22/03/2016	0.0070	0.1687	0.0481	0.0371
3	22/03/2016	0.0056	0.0454	0.0159	0.0127
4	22/03/2016	0.0008	0.0515	0.0135	0.0091
5	22/03/2016	0.0013	0.0452	0.0119	0.0081
6	22/03/2016	0.0027	0.0526	0.0155	0.0108
7	22/03/2016	0.0014	0.0481	0.0129	0.0087
8	22/03/2016	0.0010	0.0420	0.0114	0.0071
9	22/03/2016	0.0007	0.0310	0.0085	0.0054
10	22/03/2016	0.0037	0.0524	0.0165	0.0120

Tabla 11: Longitud de onda incluida turbidez

- Luego obtuvimos los valores de absorbancia sin turbidez en las longitudes de onda 664, 647 y 630 nm, las cuales son necesarias para el cálculo de clorofila-a.

Estación	Absorbancia Sin Turbidez		
	664	647	630
1	0.164	0.042	0.030
2	0.162	0.041	0.030
3	0.040	0.010	0.007
4	0.051	0.013	0.008
5	0.044	0.011	0.007
6	0.050	0.013	0.008
7	0.047	0.012	0.007
8	0.041	0.010	0.006
9	0.030	0.008	0.005
10	0.049	0.013	0.008

Tabla 12: Longitud de onda, sin turbidez

5.1.4. Resultados de Clorofila A

Los valores finales de clorofila-a obtenidos con el método de Jeffrey (1975) son indicados en la tabla 14, se incluyen coordenadas.

Estación	Clorofila-a (µg/L)	E UTM 18S	N UTM 18S
1	752.7	283 396	8 649 514
2	740.2	283 397	8 649 518
3	45.5	283 322	8 649 888
4	77.4	283 317	8 649 890
5	67.1	283 312	8 649 895
6	228.4	282 701	8 650 247
7	214.0	282 717	8 650 237
8	187.7	282 589	8 650 207
9	138.7	282 522	8 650 131
10	371.1	282 601	8 650 056

Tabla 13: Datos finales de clorofila-a

5.1.5. Estado trófico

Los valores de TSI obtenidos para cada punto de muestreo permiten conocer el estado trófico del agua (tabla 15)

$$TSI_{(Clorofila)} = 10 \times \left(2.46 + \frac{\ln Cl-a}{\ln 2.5} \right) \frac{mg}{m^3}$$

Puntos	Concentración (Clorofila – a)	TSI	Categoría
1	752.7	96.9	Hipereutrófico
2	740.2	96.7	Hipereutrófico
3	45.5	66.3	Eutrófico
4	77.4	72.1	Eutrófico
5	67.1	70.5	Eutrófico
6	228.4	83.9	Eutrófico
7	214.0	83.2	Eutrófico
8	187.7	81.7	Eutrófico
9	138.7	78.4	Eutrófico
10	371.1	89.2	Eutrófico

Tabla 14: Valores finales de eutrofización en los puntos de muestreo

Los resultados obtenidos por muestreo indican que la mayor parte de la laguna presenta un estado trófico de eutrofizado y en el sector sur hay áreas hipereutrofizadas.

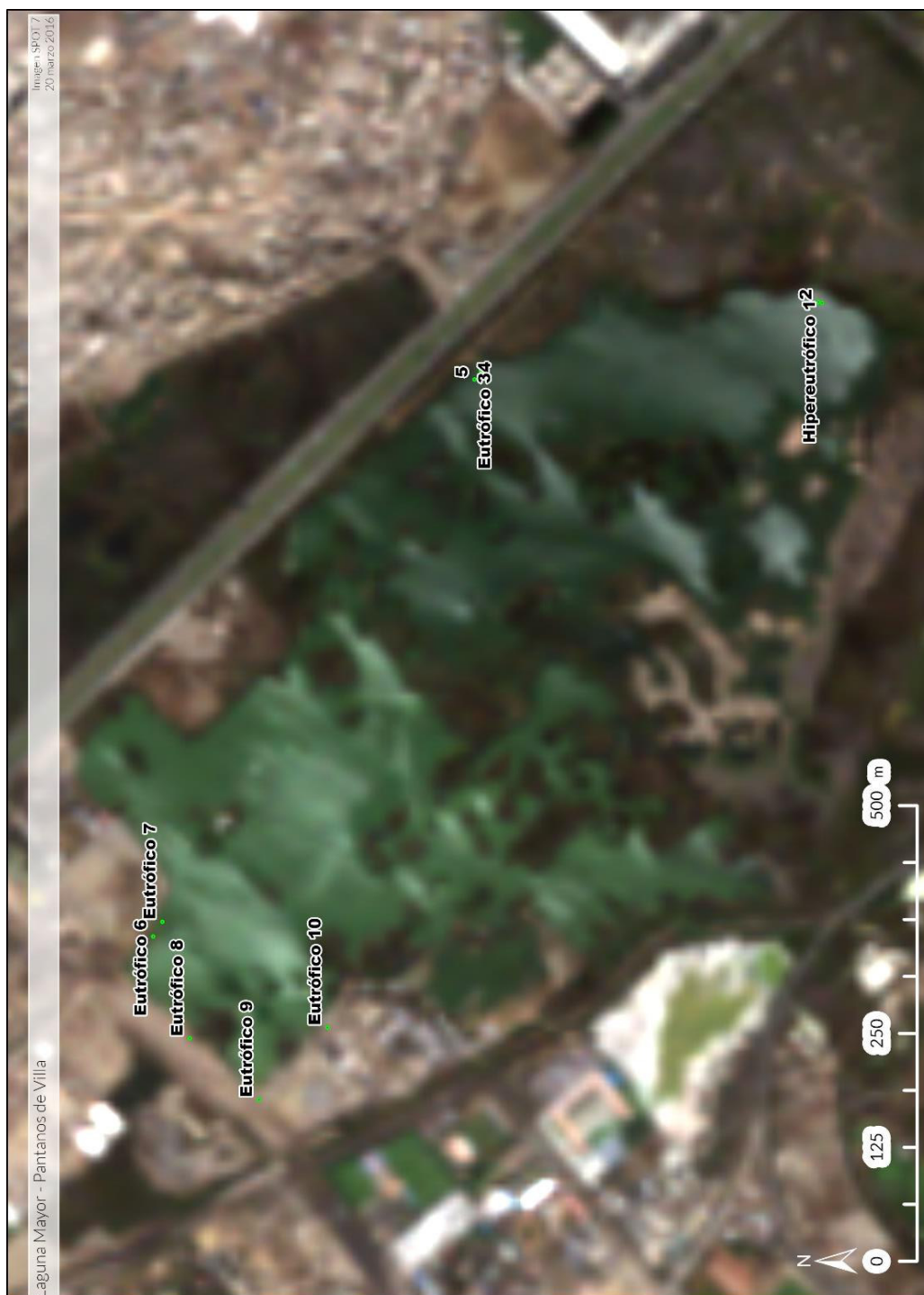


Figura 19: Resultados Estado Trófico por muestreo de campo

5.2. Estimación de la Clorofila A mediante teledetección

5.2.1. Procesamiento de las imágenes satelitales

Las imágenes fueron procesadas según lo descrito en la metodología, se realizaron correcciones radiométricas y atmosféricas, posteriormente se recortaron sobre una misma zona de interés a fin de

comparar los distintos valores de reflectancia, se han obtenido las siguientes imágenes

Imagen Satelital	Reflectancia	Método	Abreviatura
Landsat	Superficial	DOS	Landsat DOS
SPOT	A tope de atmosfera	TOA	SPOT TOA
SPOT	Superficial	DOS	SPOT DOS
SPOT	Superficial	ATCOR marítimo	SPOT AT-m
SPOT	Superficial	ATCOR urbano	SPOT AT-u

Los detalles de cada imagen obtenida son los siguientes:

a) Landsat DOS

Luego de aplicar corrección atmosférica de tipo DOS (Dark- Object Sustract), se obtuvieron los siguientes parámetros estadísticos para cada banda:

Banda	Min	Max	Media	Desv. Est.
1	0.050	0.419	0.100	0.025
2	0.053	0.433	0.095	0.031
3	0.046	0.526	0.092	0.044
4	0.033	0.563	0.095	0.060
5	0.012	0.651	0.103	0.092
6	-0.021	1.193	0.101	0.106
7	-0.028	1.184	0.079	0.088



Figura 20: Imagen Landsat DOS

b) Imagen SPOT (Reflectancia TOA)

La reflectancia TOA fue obtenida empleando únicamente los parámetros indicados en la metadata. El raster resultante tiene los siguientes parámetros estadísticos para cada banda:

Banda	Min	Max	Media	Desv. Est.
1	0.0827	0.9297	0.1346	0.0201
2	0.0568	0.8888	0.1225	0.0277
3	0.0246	0.9755	0.1140	0.0373
4	0.0085	0.8938	0.1158	0.0502



Figura 21: Imagen SPOT TOA

c) SPOT DOS

Banda	Min	Max	Media	Desv. Est.
1	-0.0042	0.7465	0.0389	0.0199
2	-0.0046	0.7488	0.0513	0.0275
3	-0.0108	0.8501	0.0611	0.037
4	-0.0179	0.7986	0.0746	0.0499



Figura 22: Imagen SPOT DOS

d) Reflectancia superficial (ATCOR Marítimo)

El raster resultante al aplicar el modelo de corrección atmosférica ATCOR, orientado a correcciones para ambientes marítimos, tuvo los siguientes parámetros estadísticos para cada banda:

Banda	Min	Max	Media	Desv. Est.
1	0.0084	0.9491	0.0641	0.0246
2	0.0145	0.9377	0.0863	0.0332
3	0.0032	1.0067	0.0926	0.0425
4	0.0021	1.035	0.1225	0.0626



Figura 23: Imagen SPOT con corrección ATCOR marítima

e) Reflectancia superficial (ATCOR Urbano)

El raster resultante al aplicar el modelo de corrección atmosférica ATCOR, orientado a correcciones para ambientes urbanos, tuvo los siguientes parámetros estadísticos para cada banda:

Banda	Min	Max	Media	Desv. Est.
1	0.0183	1.095	0.082	0.0281
2	0.0238	1.0551	0.104	0.0371
3	0.0105	1.1057	0.108	0.0464
4	0.0089	1.1091	0.1372	0.0667



Figura 24: Imagen SPOT ATu

5.2.2. Delimitación de perímetro de cuerpo de agua

Tal como se detalló en la metodología se emplearon diversas técnicas para la zona de estudio a fin de comparar los diversos resultados posibles, empleado en los análisis índices espectrales. Respecto a los índices utilizados para poder discriminar las superficies de agua de las que no, se presentan grandes diferencias

En primer lugar, se analizaron los histogramas obtenidos para cada índice a fin de verificar la cantidad de clases que genera cada índice, y poder establecer umbrales para separar las diversas clases

El índice MDNWI permitió obtener la mejor discriminación de agua/no agua, es decir campanas de Gauss (que representa clases) claramente diferenciadas, esto se debe a que al emplear la banda Infrarrojo Medio de la imagen Landsat, discrimina la superficie de agua e incluye áreas con vegetación inundable como totoras, carrizales, etc., propias de esta clase de ecosistemas, como se aprecia el caso del histograma de dicho índice (figura 29).

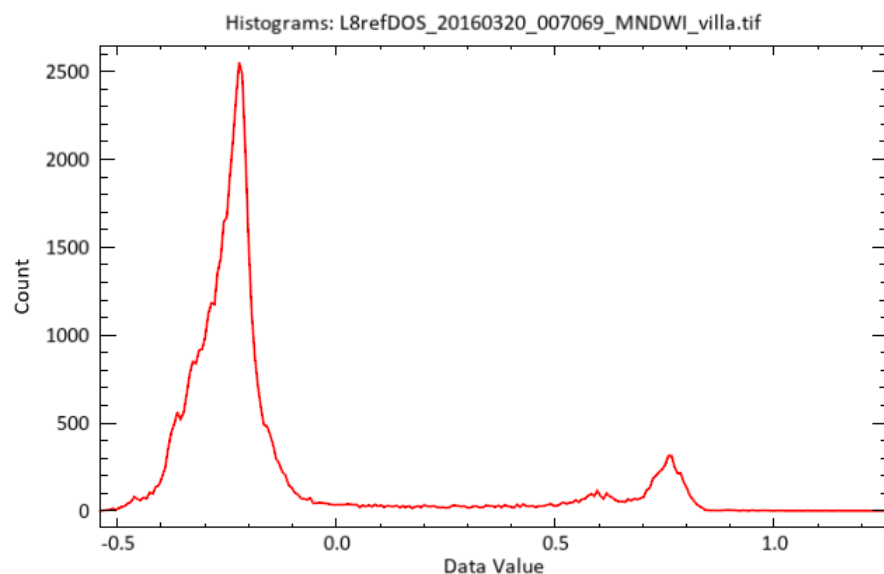


Figura 25: Índice MNDWI, Imagen Landsat DOS

Fuente: Elaboración propia

En relación al índice de NDWI aplicado existen claras diferencias en los histogramas, en el caso de las imágenes Landsat las curvas gaussianas están claramente diferenciadas y alejadas entre sí (Figura 30); en el caso de las imágenes SPOT se puede apreciar que luego de realizar la corrección atmosférica ATCOR los valores de umbral de NDWI están por debajo de 0, esto es debido a que la corrección atmosférica elegida redujo considerablemente los niveles de

reflectancia en verde generando que al realizar la sustracción de la banda NIR esta diferencia sea mayor y los resultados sean negativos, esto sin embargo no limita la capacidad del índice para discriminar superficies de agua de las superficies no cubiertas por agua ya que acentúa las formas de las campanas de Gauss generadas permitiendo una mejor discriminación (Figuras 31 a 33).

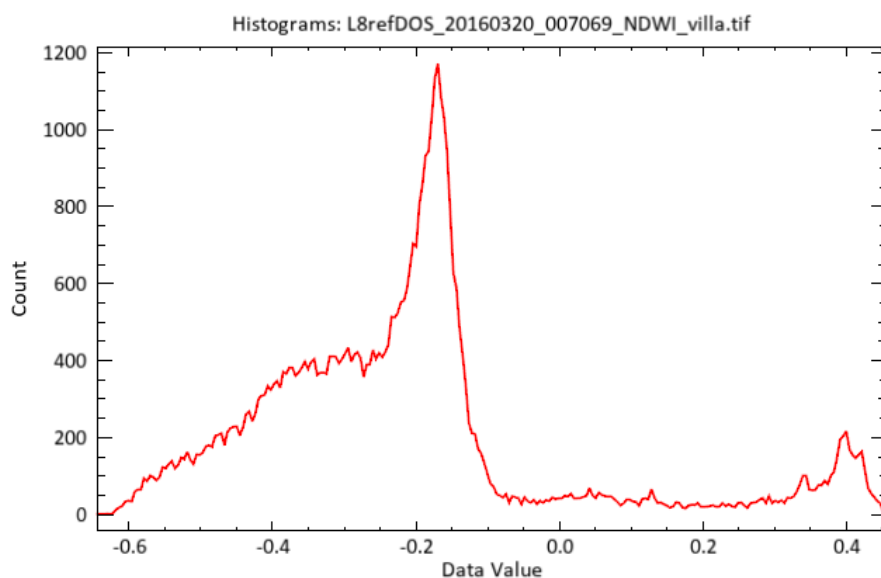


Figura 26: Índice NDWI, Imagen Landsat DOS

Fuente: Elaboración propia

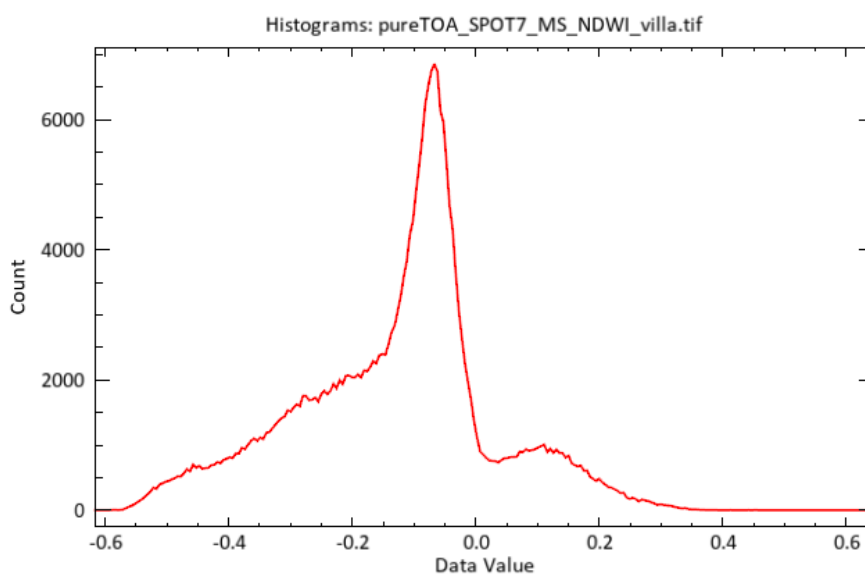


Figura 27: Índice NDWI, Imagen SPOT TOA

Fuente: Elaboración propia

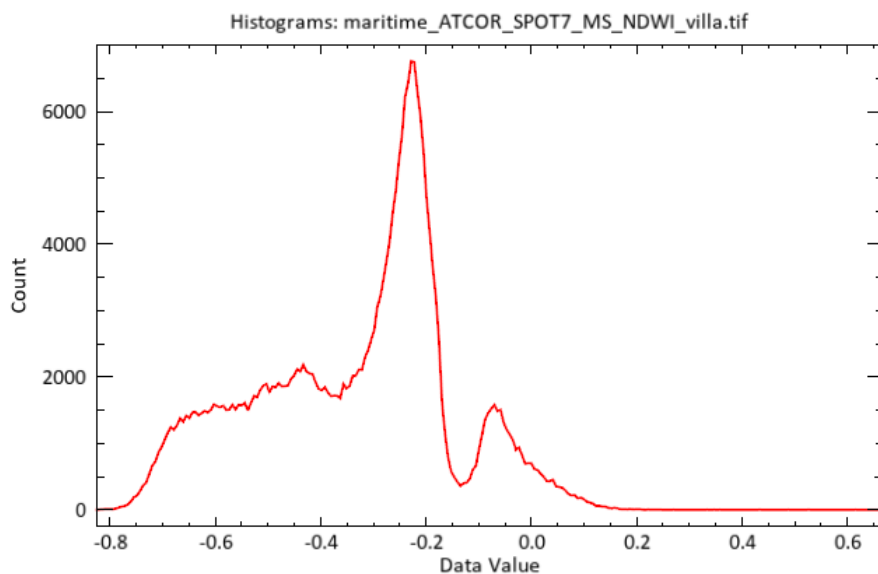


Figura 28: Índice NDWI, Imagen SPOT ATm

Fuente: Elaboración propia

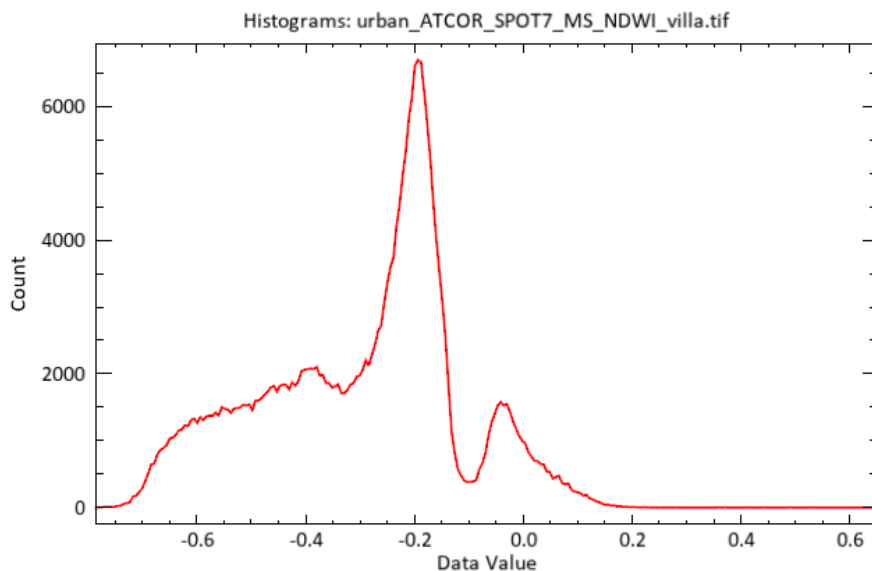


Figura 29: Índice NDWI, Imagen SPOT ATu

Fuente: Elaboración propia

Según lo analizado el índice NDWI-red empleado sobre las imágenes Landsat, no es apropiado para discriminar este tipo de cuerpos de agua de manera completa ya que en las diferentes imágenes empleadas el área identificada como agua es inferior a la que identifican los otros índices (MNDWI o NDWI); en el caso de las imágenes SPOT

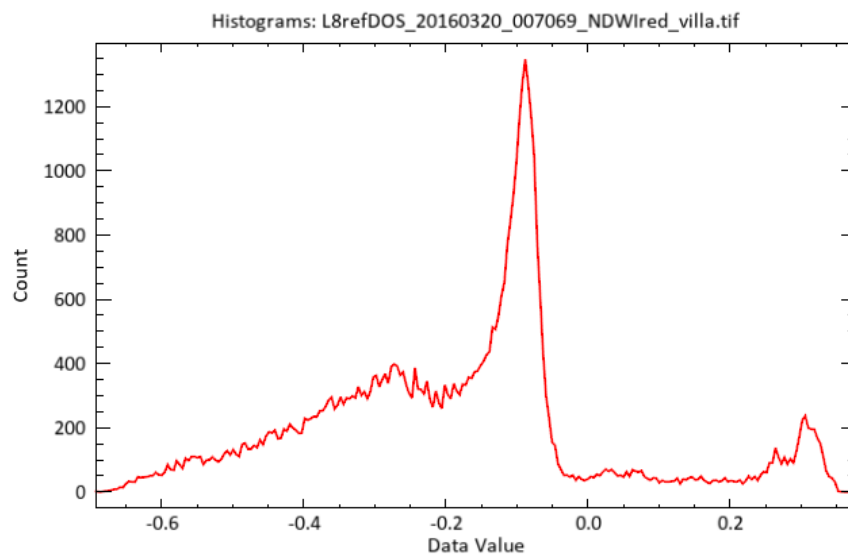


Figura 30: Índice NDWI-red, Imagen Landsat DOS
Fuente: Elaboración propia

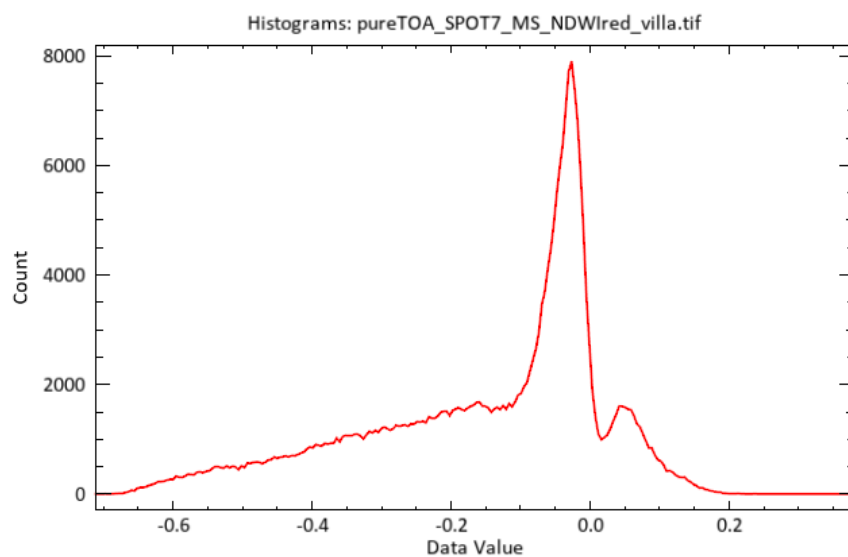


Figura 31: Índice NDWI-red, Imagen SPOT con corrección TOA
Fuente: Elaboración propia

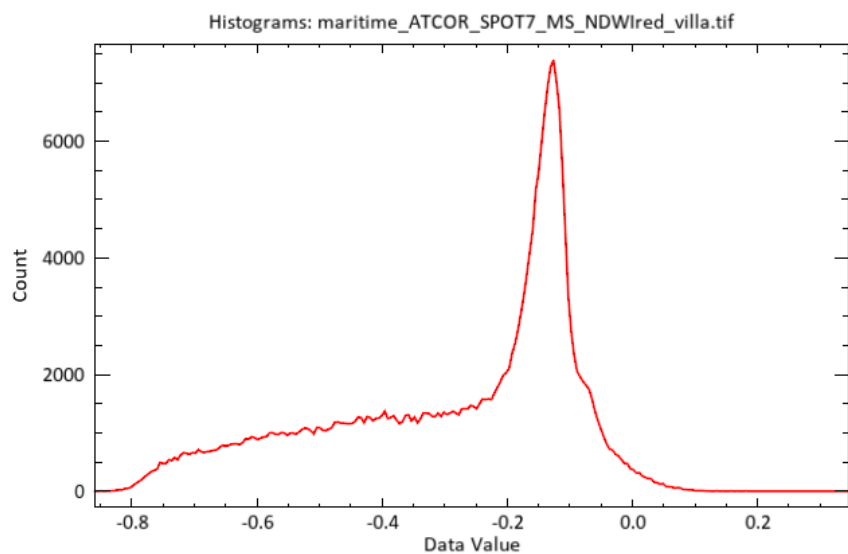


Figura 32: Índice NDWI-red, Imagen SPOT con corrección ATCOR marítima

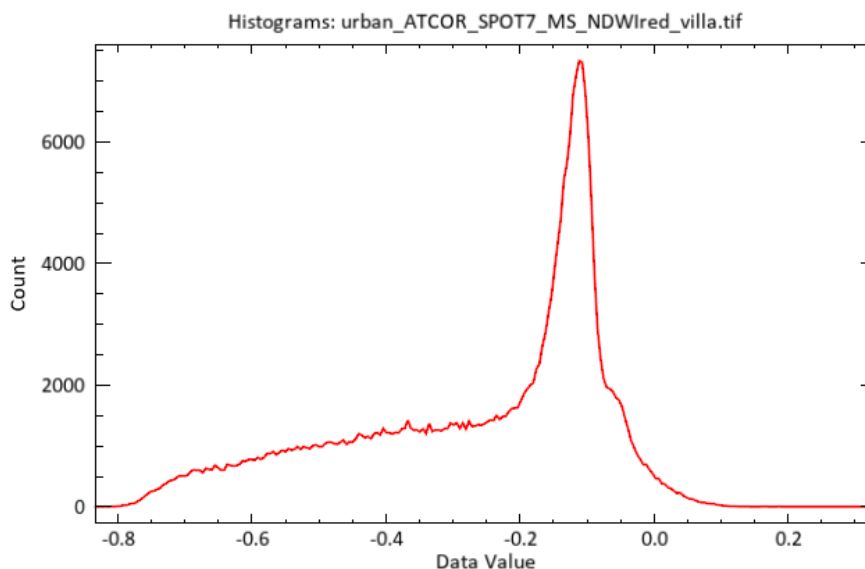


Figura 33: Índice NDWI-red, Imagen SPOT con corrección ATCOR urbana

Fuente: Elaboración propia

Los histogramas obtenidos permitieron establecer umbrales a fin de poder discriminar los valores que indican presencia de cuerpos de agua en mapas. Se obtuvieron los siguientes resultados:

Satélite	Tipo de Reflectancia	Índice aplicado	Valor umbral de	Área laguna (ha)
Landsat	DOS	MNDWI	0 a mas	32.83
Landsat	DOS	NDWI	0 a mas	14.44
Landsat	DOS	NDWI-red	-0.01 a mas	10.78
SPOT	TOA	NDWI	0 a mas	22.78
SPOT	TOA	NDWI-red	-0.01 a mas	9.29
SPOT	ATCOR Marítima	NDWI	-0.10 a mas	10.2
SPOT	ATCOR Marítima	NDWI-red	-0.10 a mas	5.98
SPOT	ATCOR Urbana	NDWI	-0.10 a mas	11.54
SPOT	ATCOR Urbana	NDWI-red	-0.10 a mas	7.70

Tabla 15: Resultados de índices aplicados

El empleo del índice NDWI ha permitido obtener y categorizar como superficie de agua una mayor área de la laguna mayor, en cambio el índice NDWI-red en nuestro caso particular el sector sur de la laguna no es clasificado como agua por este índice.

A fin de mejorar la exactitud temática de la clasificación se ha incorporado las características de las firmas espectrales de las bandas añadiendo un factor adicional basado en el valor de reflectancia del agua teórico máximo para las bandas empleadas. De esta manera fue posible mover el valor del umbral a la izquierda. Los resultados de esta nueva iteración están indicados en la siguiente tabla:

Satélite	Tipo de Reflectancia	Índice aplicado	Valor de umbral	Área laguna (ha)
Landsat	DOS	MNDWI	-0.03 a mas	34.52
			-0.05 a mas	35.42
Landsat	DOS	NDWI	-0.03 a mas	16.18
			-0.05 a mas	17.39
			-0.1	21.31
SPOT	TOA	NDWI	-0.01 a mas	24.62
			-0.03 a mas	25.21
			-0.04 a mas	26.57
SPOT	DOS	NDWI	-0.05 a mas	8.95
			-0.15 a mas	11.41
			-0.22 a mas	19.96
SPOT	ATCOR Marítima	NDWI	-0.16 a mas	12.75
			-0.20 a mas	20.87
			-0.23 a mas	21.46
SPOT	ATCOR Urbana	NDWI	-0.15 a mas	19.12
			-0.18 a mas	22.26

Tabla 16: Resultados de índices. Segundo análisis

Como se evidencia únicamente el uso de índices es insuficiente para realizar una correcta discriminación de los cuerpos de agua debido a que al ser únicamente una relación entre bandas se puede presentar errores de comisión al categorizar como cuerpos de agua superficies que no lo son como: superficies de asfalto y otras superficies que por las particularidades de cada banda pueden ofrecer valores de índices de tipo falso positivo.

Respecto a las imágenes empleadas se evidencia que una imagen de alta resolución (SPOT) permite obtener mayor nivel de detalle y realizar un mejor mapeo de la cobertura identificable como agua en comparación a una imagen de resolución mediana como Landsat al emplear el mismo índice.

El empleo de los índices, reforzados con el análisis de firmas espectrales ha permitido obtener y categorizar como cuerpo de agua el área de la laguna mayor (figuras del 38 a 41)

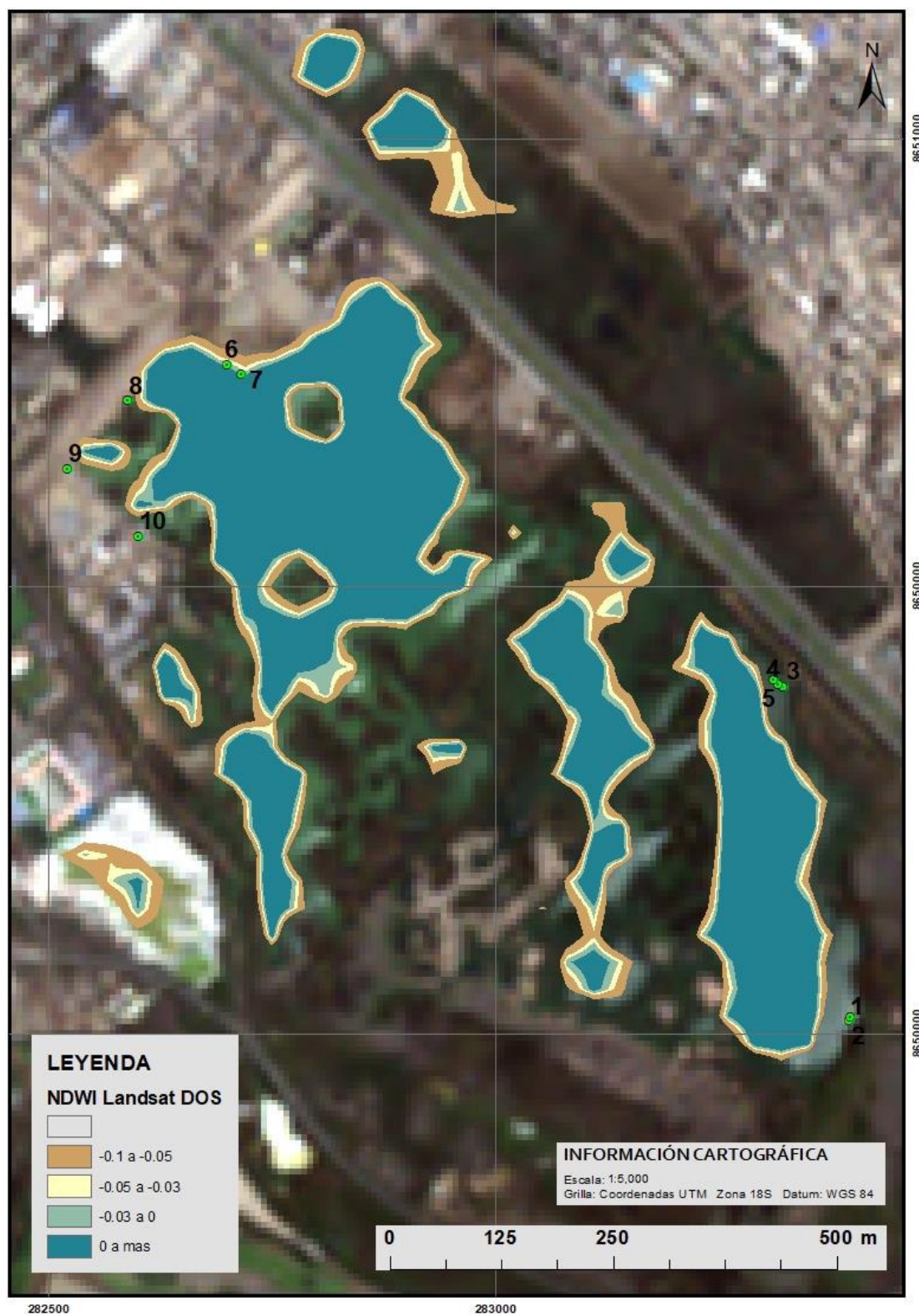


Figura 34: Mapa de NDWI en imagen Landsat con corrección DOS
 Fuente: Elaboración propia

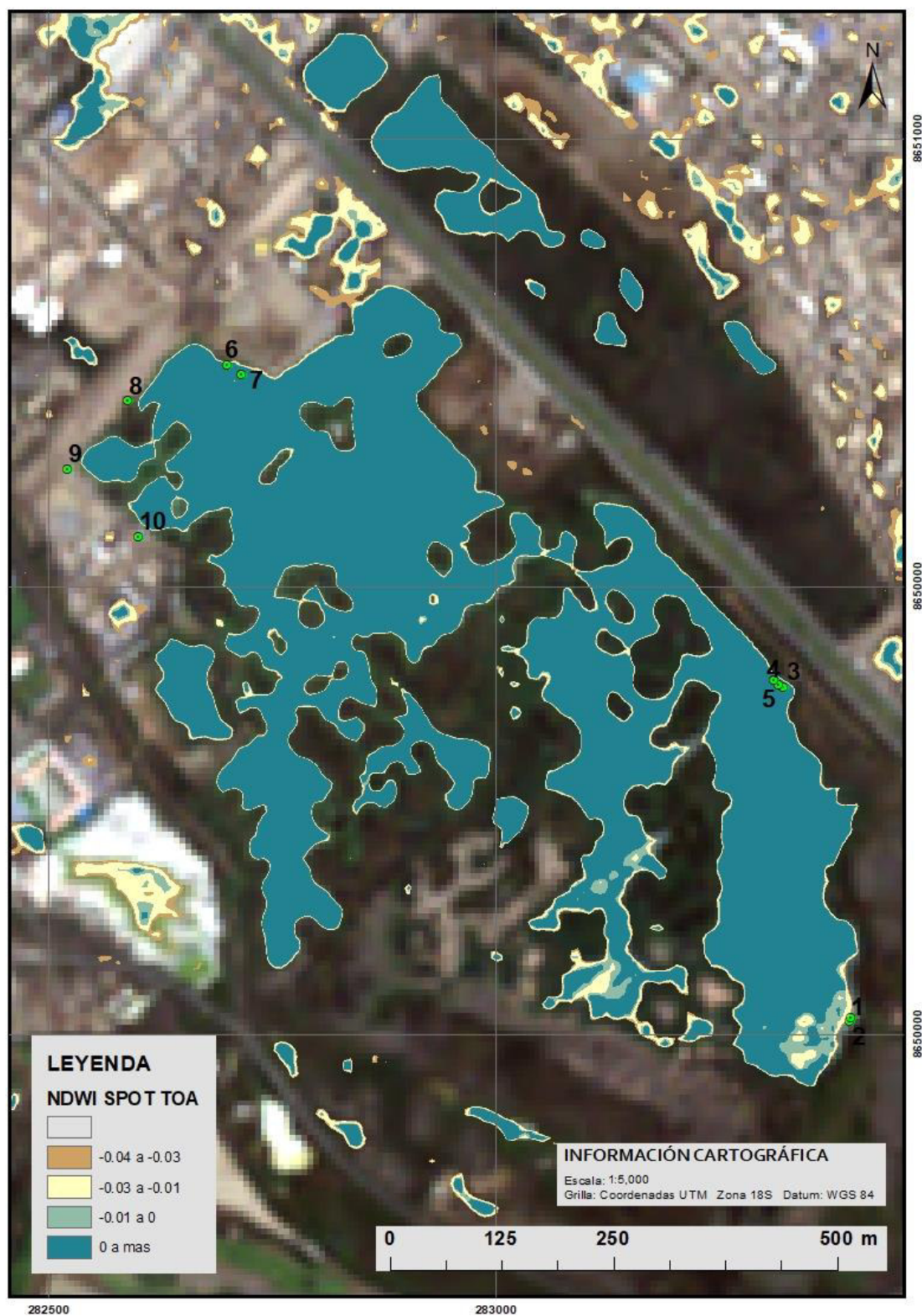


Figura 35: Mapa de NDWI en base a una imagen SPOT de reflectancia TOA

Fuente: Elaboración propia

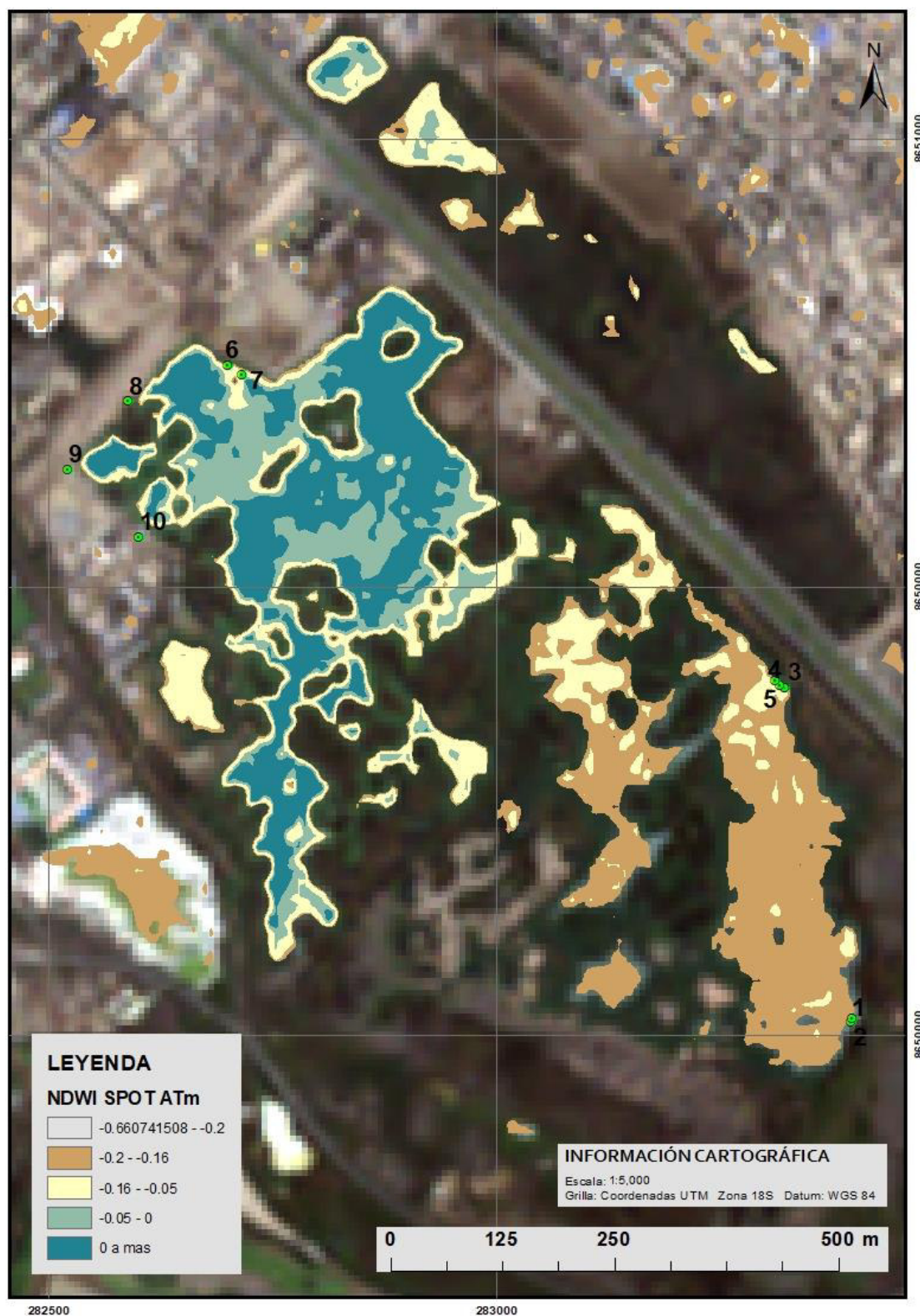


Figura 36: Mapa de NDWI en imagen SPOT ATCOR marítima (Atm)

Fuente: Elaboración propia

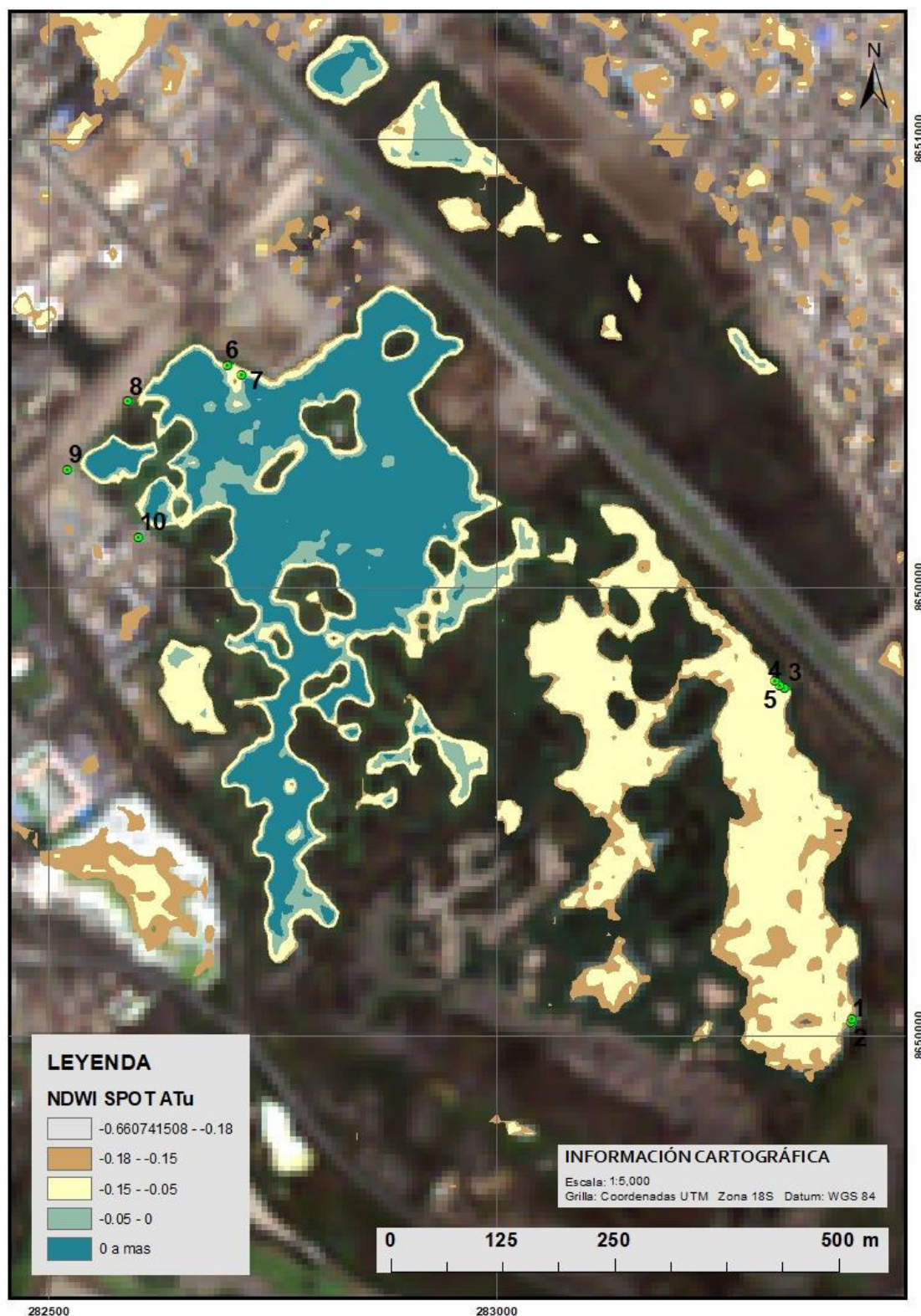


Figura 37: Mapa de NDWI en imagen SPOT ATCOR urbana

Fuente: Elaboración propia

5.2.3. Correlación entre clorofila-A y datos satelitales

5.2.3.1. Selección de muestras para análisis de regresión

Se obtuvieron los valores de reflectancia de cada punto de muestreo mediante la herramienta “Extraer valores múltiples a puntos” de ArcGIS, los valores extraídos son:

N°	Clorofila-a (µg/L)	Red	Green	Blue	NIR
SPOT TOA					
1	752.7	0.123	0.1346	0.1376	0.1503
2	740.2	0.1364	0.1472	0.1471	0.1584
3	45.5	0.0837	0.1075	0.117	0.0878
4	77.4	0.0915	0.1166	0.1219	0.0967
5	67.1	0.087	0.11	0.1193	0.0995
6	228.4	0.0968	0.1175	0.1179	0.1168
7	214.0	0.0895	0.12	0.1169	0.0989
SPOT DOS					
1	752.7	0.0850	0.0782	0.0557	0.1140
2	740.2	0.0845	0.0791	0.0543	0.1173
3	45.5	0.0382	0.0425	0.0246	0.0662
4	77.4	0.0392	0.0435	0.0265	0.0588
5	67.1	0.0333	0.0371	0.0228	0.0694
6	228.4	0.0523	0.0479	0.0248	0.0892
7	214.0	0.0416	0.0508	0.0232	0.0645
SPOT ATCOR Marítimo (ATm)					
1	752.7	0.1148	0.1102	0.0755	0.1707
2	740.2	0.1183	0.1183	0.0819	0.1743
3	45.5	0.0576	0.0675	0.041	0.092
4	77.4	0.0658	0.0773	0.0464	0.1038
5	67.1	0.0596	0.0687	0.0436	0.1075
6	228.4	0.0742	0.08	0.0436	0.1268
7	214.0	0.065	0.0836	0.0418	0.1002
SPOT ATCOR Urbano (ATu)					
1	752.7	0.1322	0.1307	0.0951	0.1885
2	740.2	0.1361	0.1397	0.1024	0.1924
3	45.5	0.0698	0.083	0.0557	0.1046
4	77.4	0.0788	0.0939	0.0618	0.1173
5	67.1	0.0721	0.0843	0.0586	0.1211
6	228.4	0.088	0.0969	0.0586	0.1418
7	214.0	0.0779	0.101	0.0566	0.1134

5.2.3.2. Análisis de firmas espectrales en imágenes de Reflectancia

Luego se graficaron las firmas espectrales agrupándolas por estaciones de muestreo y según el tipo de imagen de reflectancia empleada:

SPOT TOA
SPOT DOS
SPOT AT_m
SPOT AT_u

En las tres primeras estaciones de muestreo (puntos 1 al 7) las firmas corresponden a un comportamiento típico de cuerpos de agua con alta producción primaria de clorofila, es decir valores más altos en las bandas azul (Blue) y verde (Green) luego una disminución de la reflectancia en la banda Roja (Red) para luego incrementarse en el Infrarrojo Cercano (NIR). En el caso de las estaciones de muestreo 4 y 5 (los puntos 8, 9 y 10), se observa que la firma obtenida no es similar al comportamiento estándar de un cuerpo de agua de estas características, esto coincide con lo determinado en el punto anterior mediante el análisis de fotointerpretación, en estos puntos se da un incremento sostenido de valores de reflectancia desde la banda azul hasta la infrarroja cercana. Por lo indicado los últimos puntos no corresponden al tipo de firma de un cuerpo de agua, por lo que se procedió a su descarte de posteriores análisis, por lo que se emplean los puntos identificados del 1 al 7.

Las firmas obtenidas al emplear la corrección ATCOR muestran un incremento en los valores de reflectancia respecto a sus valores base (imagen TOA), esto físicamente no es apropiado ya que la corrección atmosférica debe reducir los valores de reflectancia iniciales. Teóricamente una corrección atmosférica sustrae el componente de reflectancia añadido en la atmosfera durante la adquisición de datos, es decir la reflectancia superficial debe ser menor.

También se realizaron diagramas una vez realizada la corrección atmosférica en las imágenes satelitales según el método ATCOR empleando parámetros para ambientes marítimos (Figura 30 y 31) y ambientes urbanos (Figura 32 y 33).

En todos estos casos al analizar mediante Fotointerpretación los últimos tres puntos se evidencio que no correspondían a una cobertura

acuática pura sino mixta con predominancia terrestre debido a la coloración de la superficie.

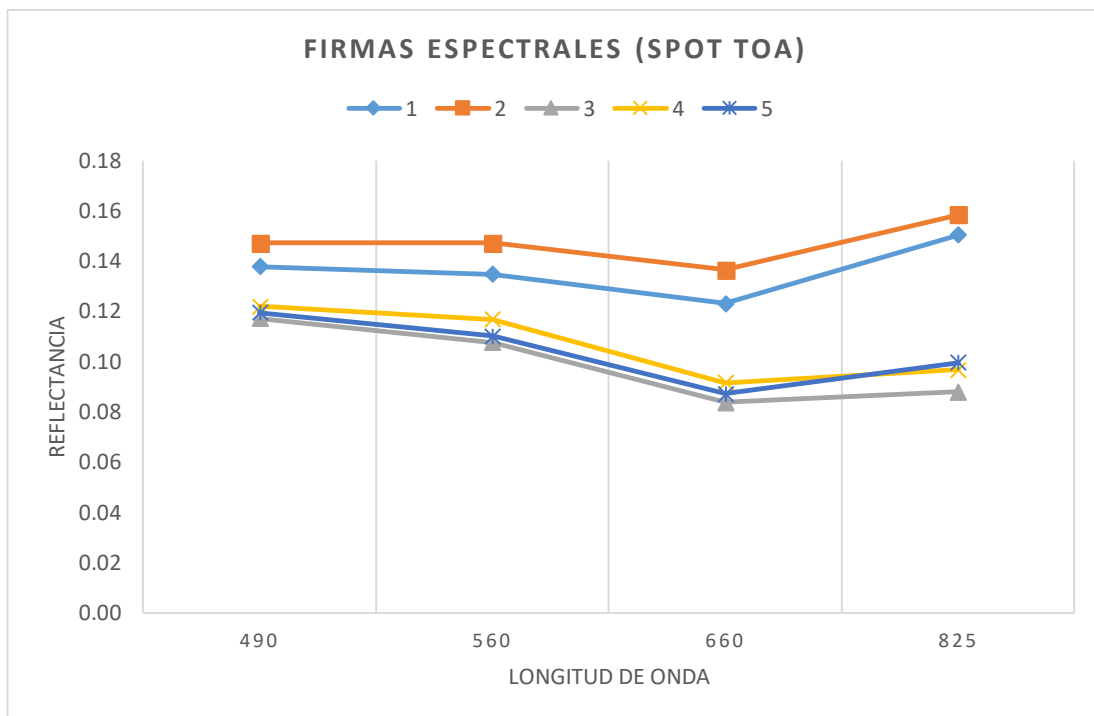


Figura 38: Firmas espectrales puntos del 1 al 5 (SPOT TOA)

Fuente: Elaboración propia

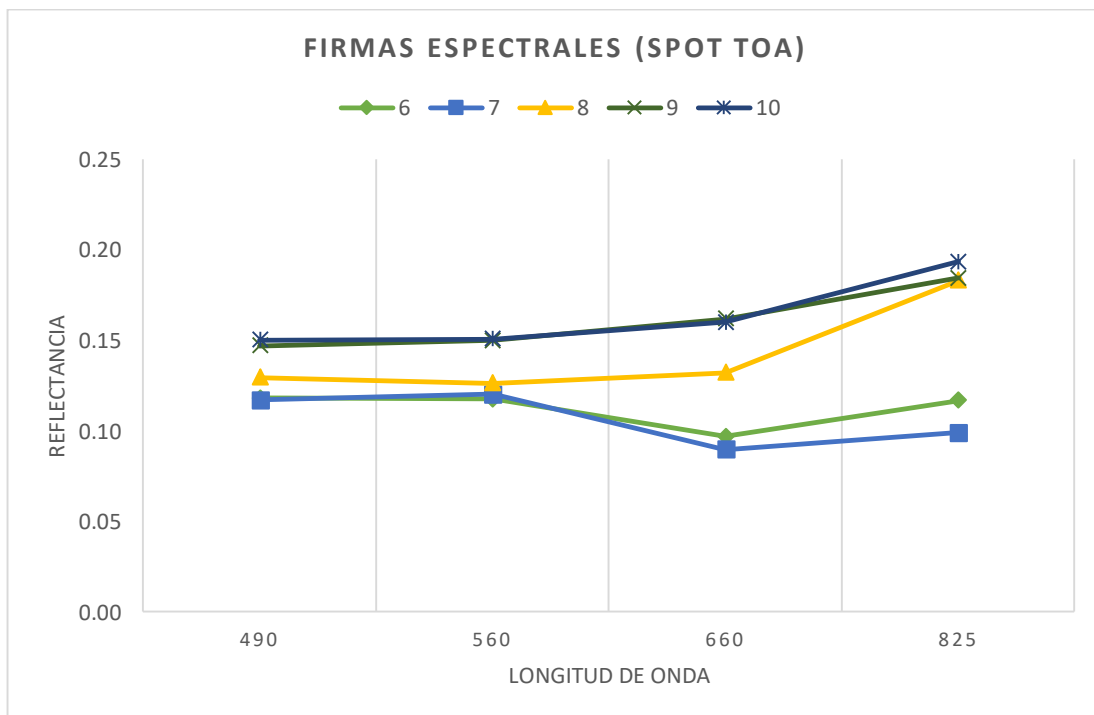


Figura 39: Firmas espectrales puntos del 6 al 10 (SPOT TOA)

Fuente: Elaboración propia

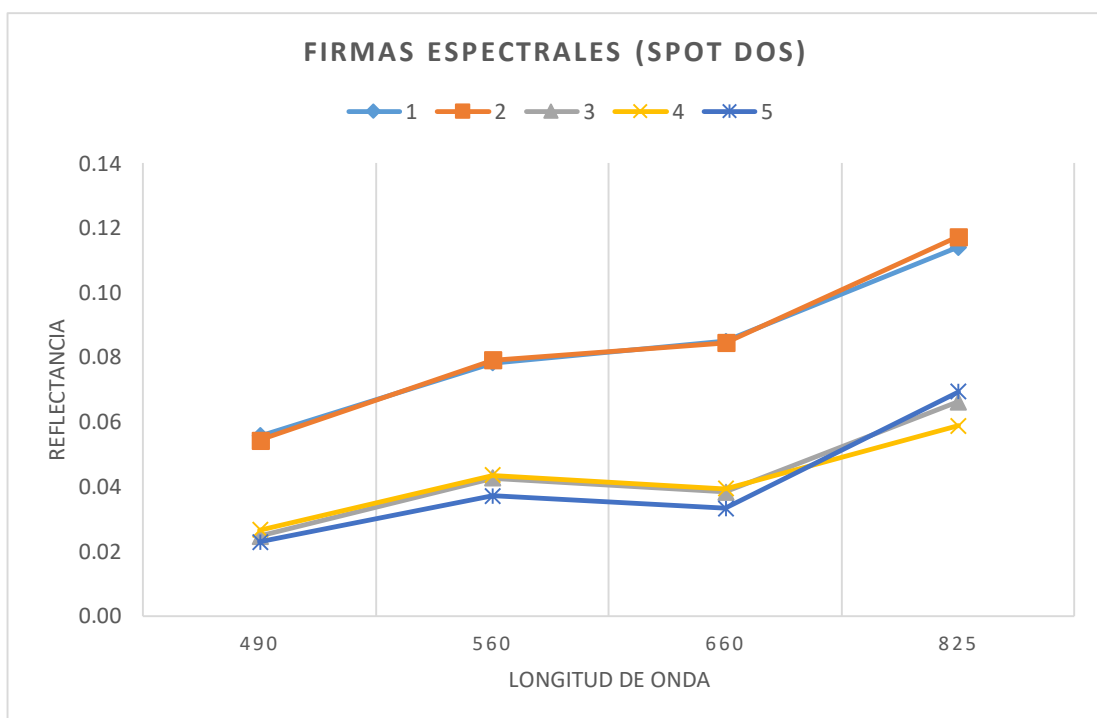


Figura 40: Firmas espectrales puntos del 1 al 5 (SPOT DOS)
Fuente: Elaboración propia

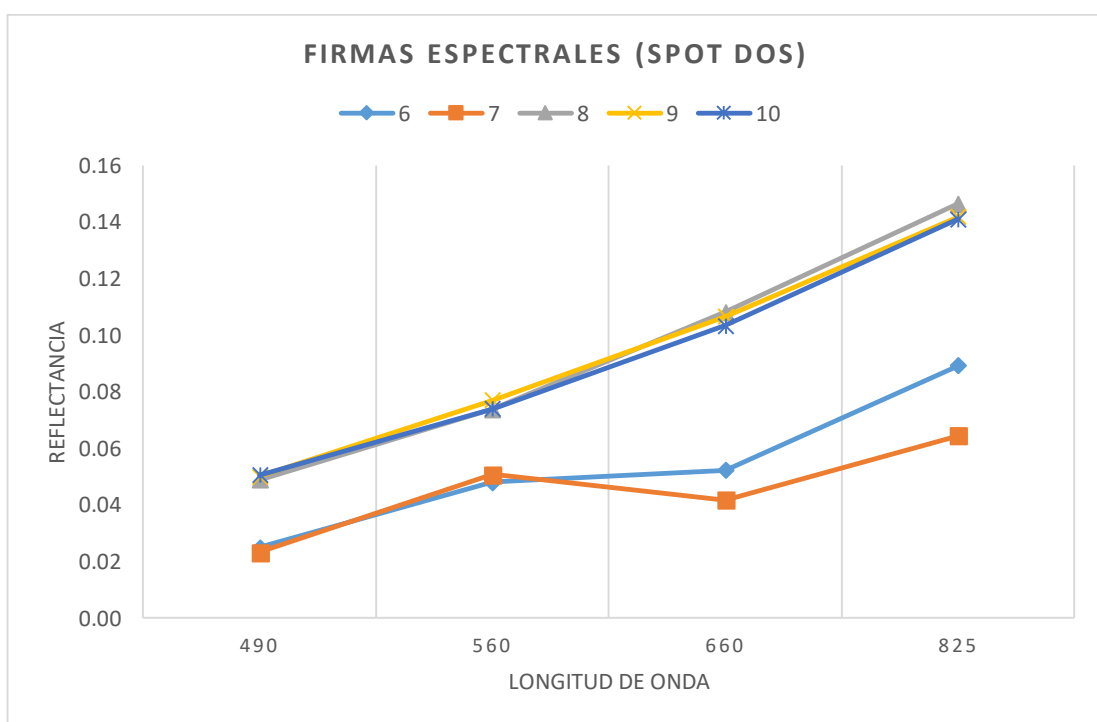


Figura 41: Firmas espectrales puntos del 6 al 10 (SPOT DOS)
Fuente: Elaboración propia

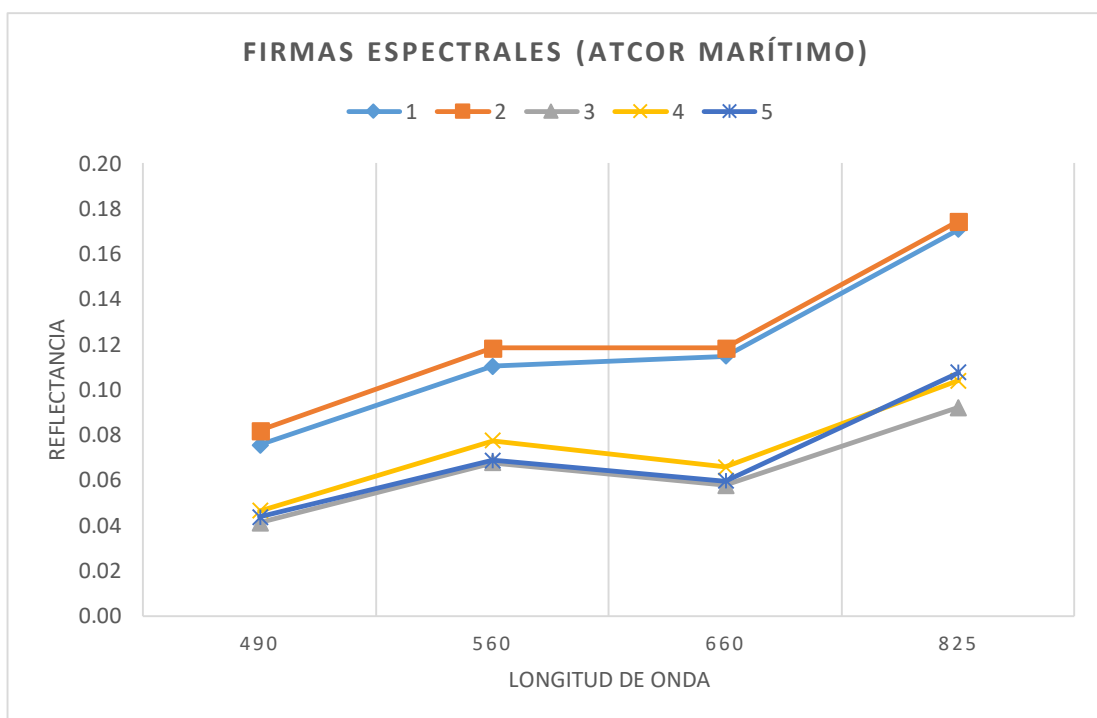


Figura 42: Firmas espectrales puntos del 1 al 5 (SPOT ATm)
Fuente: Elaboración propia

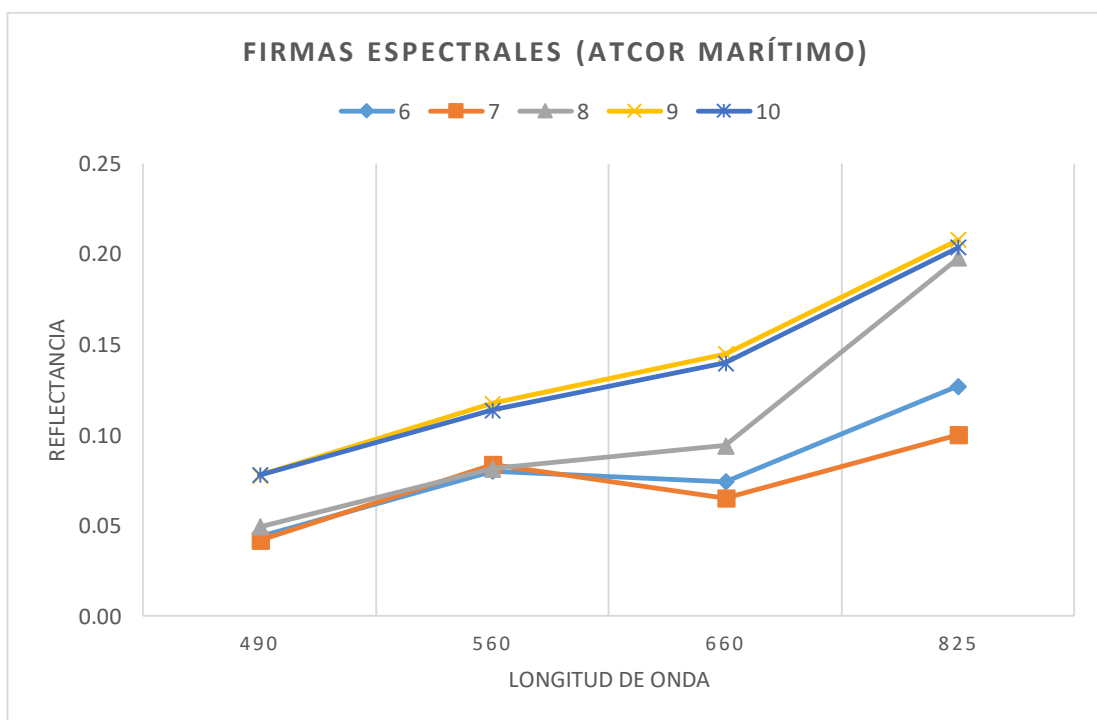


Figura 43: Firmas espectrales puntos del 6 al 10 (SPOT ATm)
Fuente: Elaboración propia

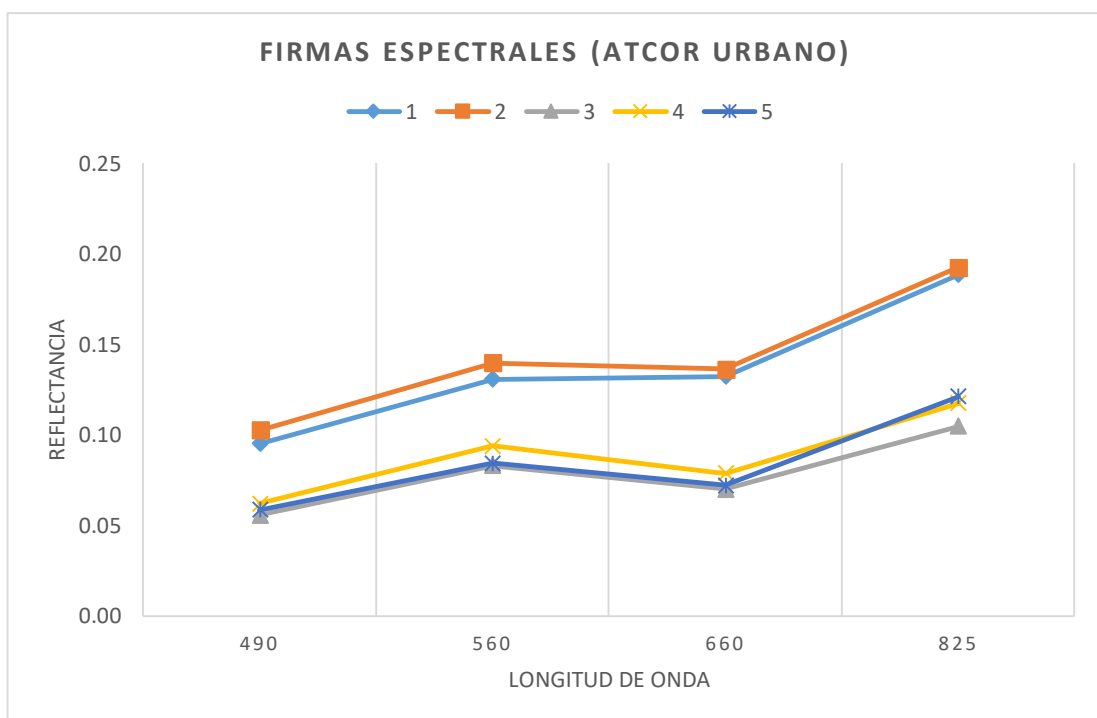


Figura 44: Firmas espectrales puntos del 1 al 5 (SPOT ATu)
Fuente: Elaboración propia

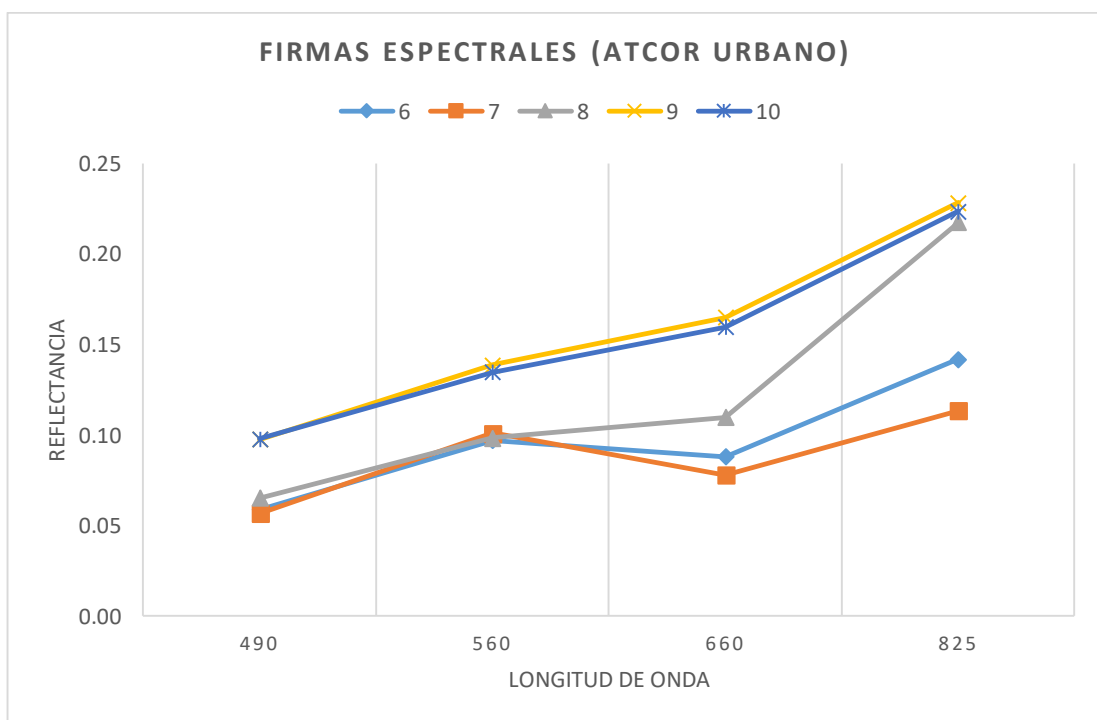


Figura 45: Firmas espectrales puntos del 6 al 10 (SPOT ATu)
Fuente: Elaboración propia

5.2.3.3. Selección de modelos

Se realizaron diversas regresiones lineales simples entre combinaciones de bandas de imágenes satelitales con los valores de clorofila-a, de esta manera pudimos obtener modelos que correlacionan ambas variables

Además, se calcularon variables estadísticas (R^2 y valor p) que permitieron seleccionar los modelos más adecuados.

Modelos	SPOT DOS		SPOT ATm		SPOT ATu	
	R^2	Valor p	R^2	Valor p	R^2	Valor p
NIR-R	0.0373	0.6781	0.5757	0.0480	0.5341	0.0621
NIR-G	0.2932	0.2093	0.6486	0.0288	0.6097	0.0382
NIR-B	0.4879	0.0808	0.8010	0.0065	0.7708	0.0094
R-G	0.6023	0.0402	0.6439	0.0299	0.6014	0.0405
R-B	0.7548	0.0111	0.8828	0.0017	0.8499	0.0031
G-B	0.3044	0.1991	0.2260	0.2809	0.1712	0.3561
NIR/R	0.5080	0.0722	0.4609	0.0935	0.3863	0.1362
NIR/G	0.0541	0.6158	0.1055	0.4773	0.1443	0.4005
NIR/B	0.3078	0.1961	0.1031	0.4826	0.0231	0.7447
R/NIR	0.6137	0.0372	0.5087	0.0720	0.4208	0.1150
R/G	0.5191	0.0678	0.7237	0.0152	0.7225	0.0154
R/B	0.0072	0.8569	0.0353	0.6866	0.1388	0.4105
G/NIR	0.0324	0.6993	0.1059	0.4764	0.1394	0.4094
G/R	0.4900	0.0799	0.6499	0.0285	0.6542	0.0276
G/B	0.2989	0.2041	0.3008	0.2024	0.2392	0.2654
B/NIR	0.4116	0.1204	0.1321	0.4229	0.0238	0.7413
B/R	0.0038	0.8959	0.0514	0.6249	0.1682	0.3608
B/G	0.4172	0.1171	0.3855	0.1368	0.2972	0.2057

Se observa que los mejores modelos varían en función del método de corrección atmosférica empleado, así, un modelo que usa valores de Reflectancia TOA para el análisis de regreso tiene un valor de R^2 alto, por ejemplo modelo Blue/Red, al emplear las mismas bandas pero con una imagen con Reflectancia superficial (marítimo y urbano) tiene valores de R^2 y valores-p que superan el umbral esto debido a que con la corrección atmosférica se han corregido los efectos de saturación en la banda azul producidos por la interacción con la atmosfera, por tanto estos modelos también son descartados.

Los modelos seleccionados son: NIR-B, R-B, R/G, debido a poseer valores dentro del rango p indicado anteriormente y tener un alto coeficiente de correlación R^2 , a continuación, se muestran la representación gráfica de las funciones de regresión indicadas para cada tipo de imagen de reflectancia:

SPOT DOS

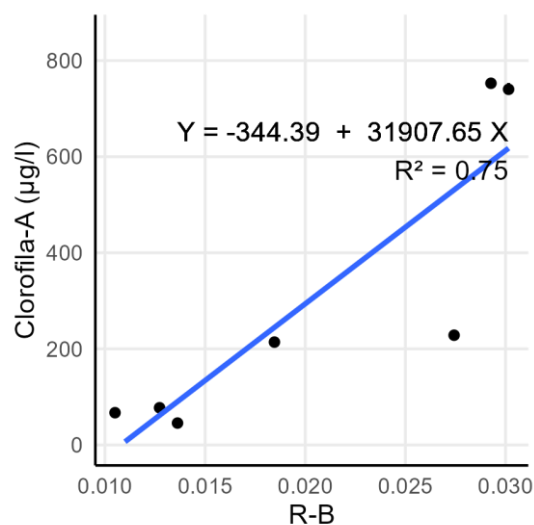


Figura 46: Mejor correlación entre concentración de clorofila-a y bandas SPOT DOS

Fuente: Elaboración propia

Reflectancia superficial (ATCOR Marítimo)

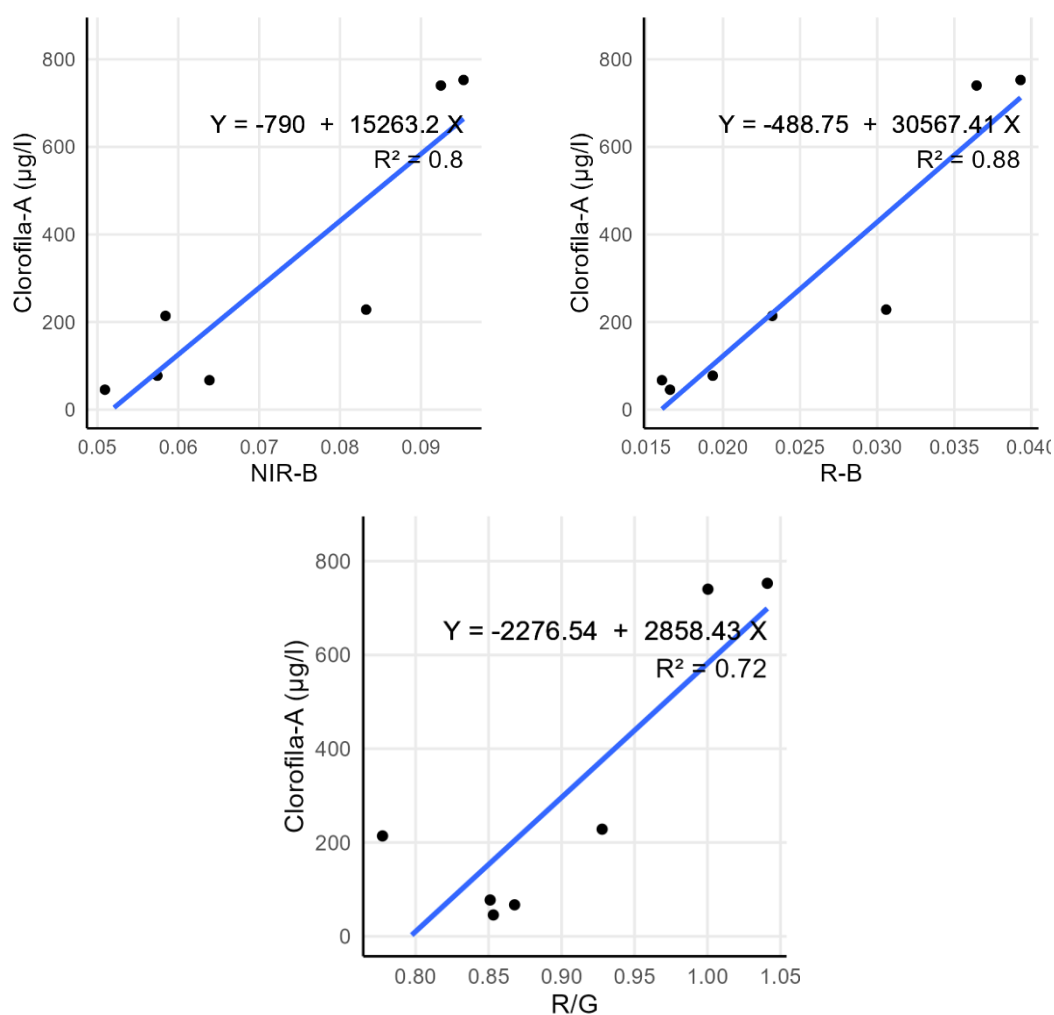


Figura 47: Mejores correlaciones de concentración de clorofila-a y bandas SPOT ATm

Fuente: Elaboración propia

Reflectancia superficial (ATCOR Urbana)

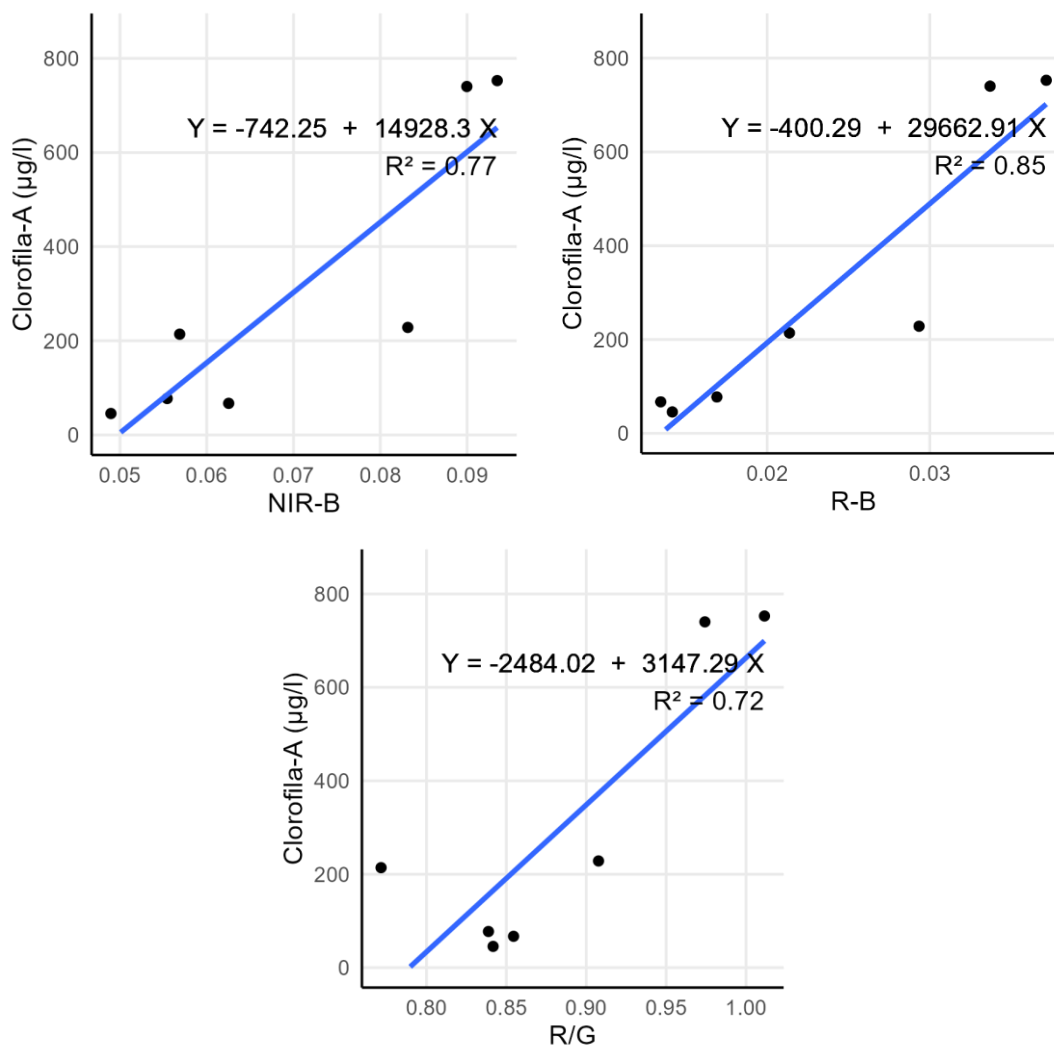


Figura 48: Mejores correlaciones de concentración de clorofila-a y bandas SPOT ATu
Fuente: Elaboración Propia

Los coeficientes de los modelos con mejores parámetros de ajuste son:

Ecuación	a	b	R2	p-value
$a^*(\text{NIR-B}) + b$	15263.2	-790.0	0.8010	0.0065
$a^*(\text{R-B}) + b$	30567.4	-488.75	0.8828	0.0017
$a^*(\text{R/G}) + b$	2858.4	-2276.5	0.7237	0.0152

5.2.4. Generación de mapas de concentración de clorofila

En base a los coeficientes obtenidos en la anterior etapa de desarrollan las siguientes ecuaciones:

Modelos lineales imagen SPOT corrección ATCOR marítima

$$Chla = 15263.2 * (NIR - B) - 790$$

$$Chla = 30567.4 * (R - B) - 488.75$$

$$Chla = 2858.4 * \left(\frac{R}{G}\right) - 2276.5$$

Estos modelos han permitido desarrollar imágenes raster de clorofila-a, los cuales sirven como insumos para la generación de mapas temáticos de concentración de clorofila-a considerando su estado trófico asociado para la Laguna Mayor de los Humedales de Villa.

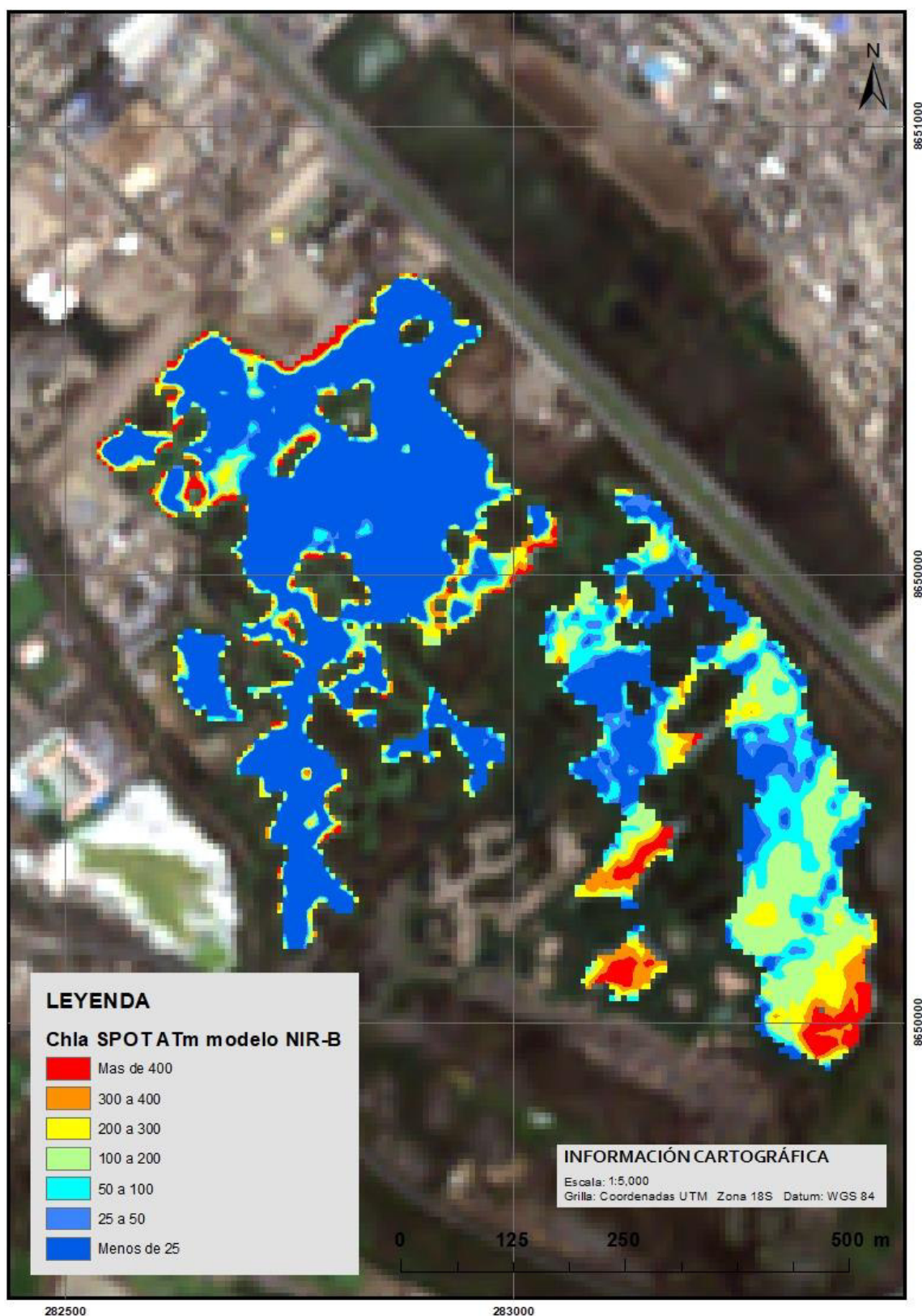


Figura 49: Mapa de concentración de clorofila-A, modelo NIR-B
Fuente: Elaboración propia

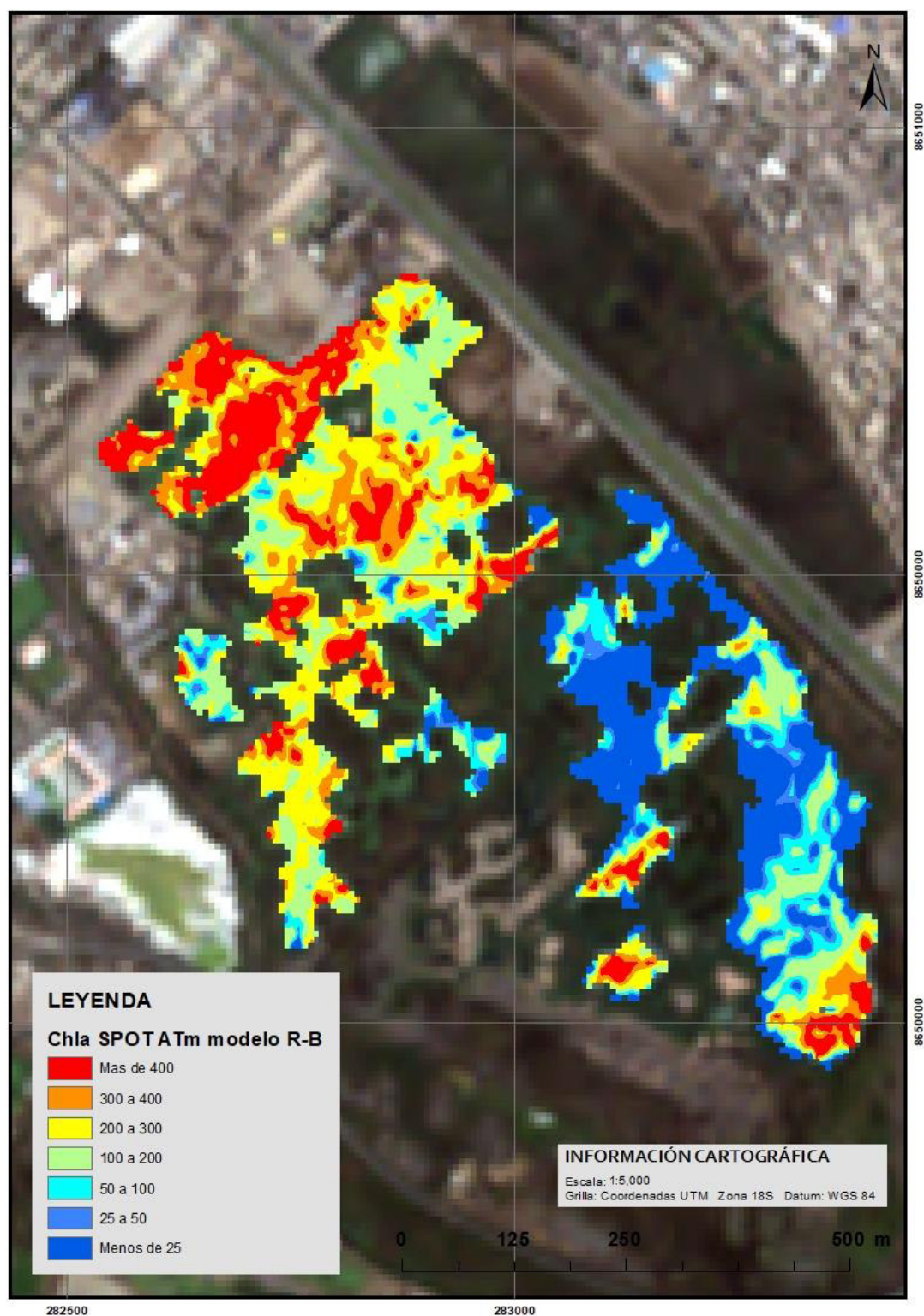


Figura 50: Mapa de concentración de clorofila-A, modelo R-B
Fuente: Elaboración propia

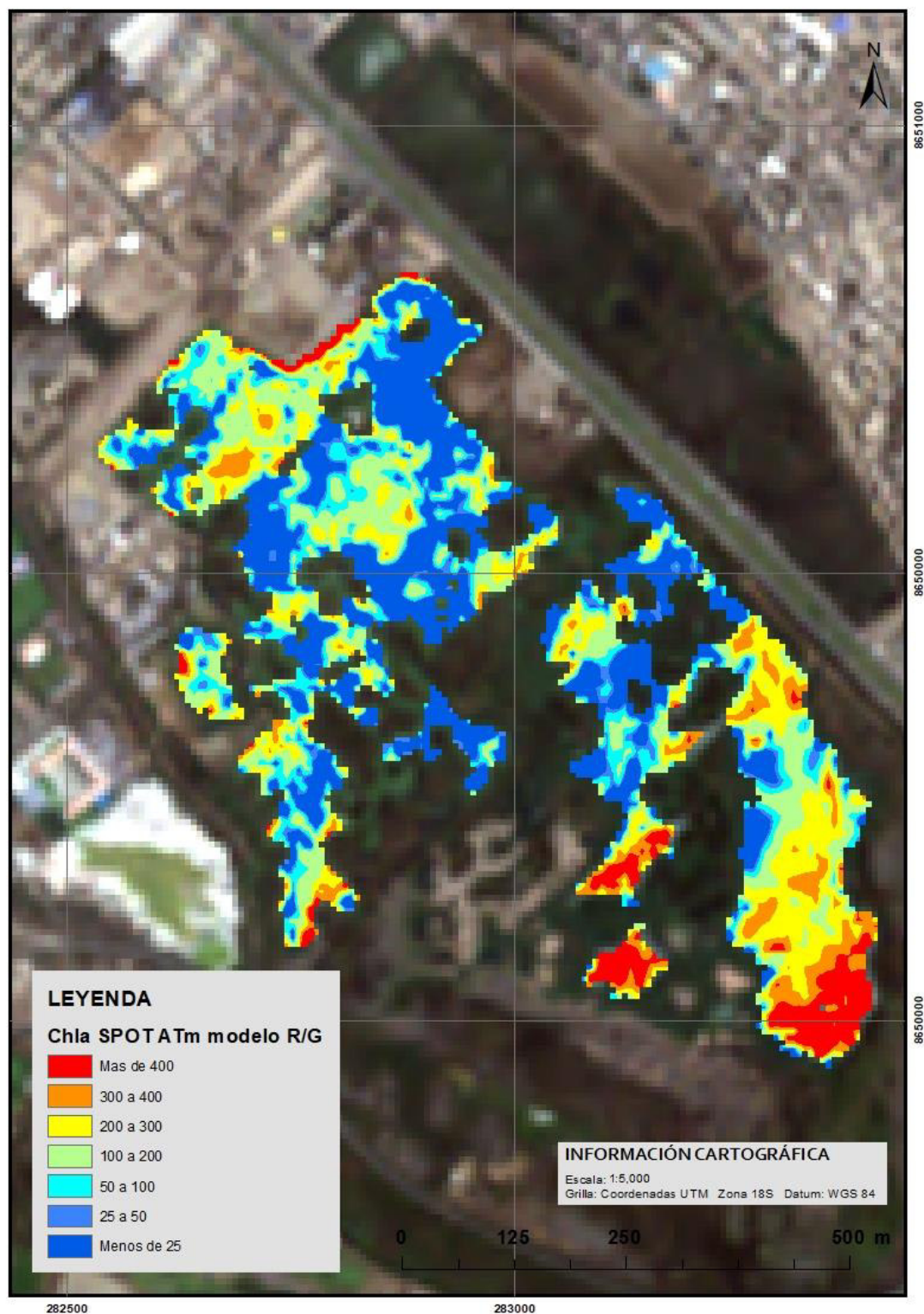


Figura 51: Mapa de concentración de clorofila-A, modelo R/G
Fuente: Elaboración propia

5.2.5. Mapas de estado trófico

Se generaron mapas de los diferentes estados tróficos obtenidos. En el **Modelo NIR-B**: se observa presencia de estado Oligotrófico y Eutrófico

(Figura 56), **Modelo R-B**: se observa presencia de estado Eutrófico (Figura 57), **Modelo R/G**: se observa presencia de estado Eutrófico (Figura 58). Los últimos dos resultados coinciden con los estudios de Álvarez (2016) y Cepeda (2016) en la misma área de estudio desde otros enfoques.

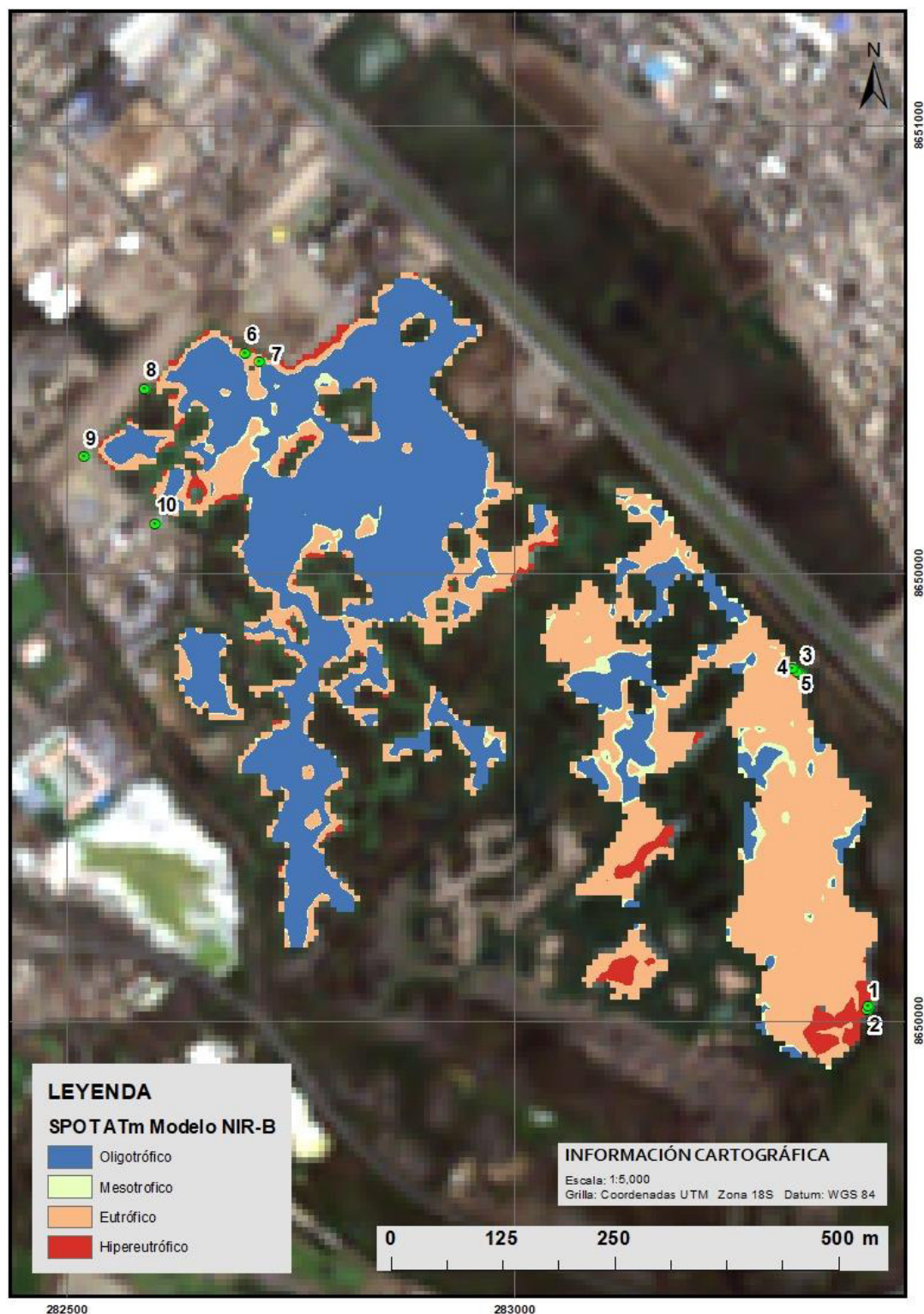


Figura 52: Mapa de estado trófico modelo NIR-B

Fuente: Elaboración propia

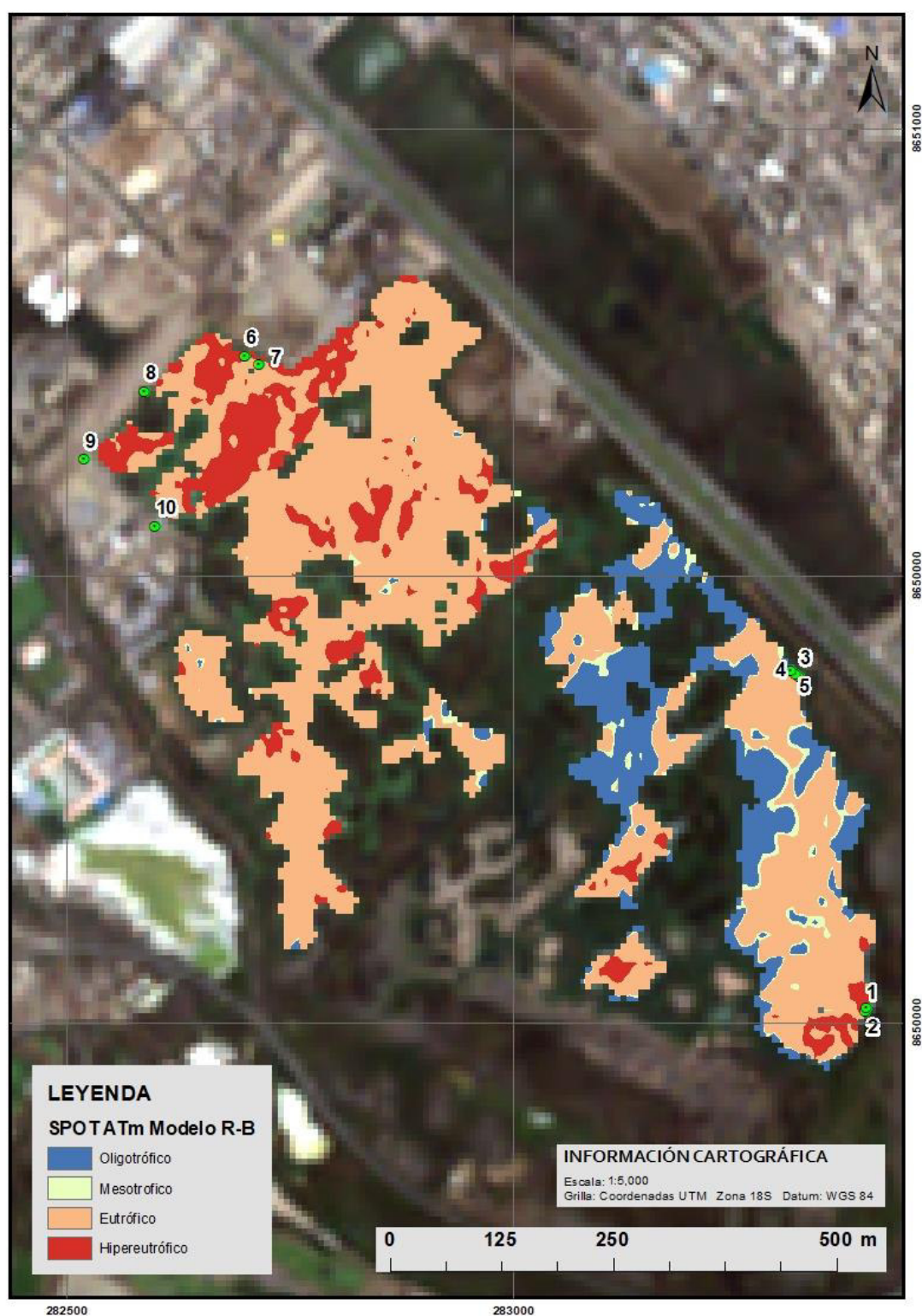


Figura 53: Mapa de estado trófico modelo R-B
Fuente: Elaboración propia

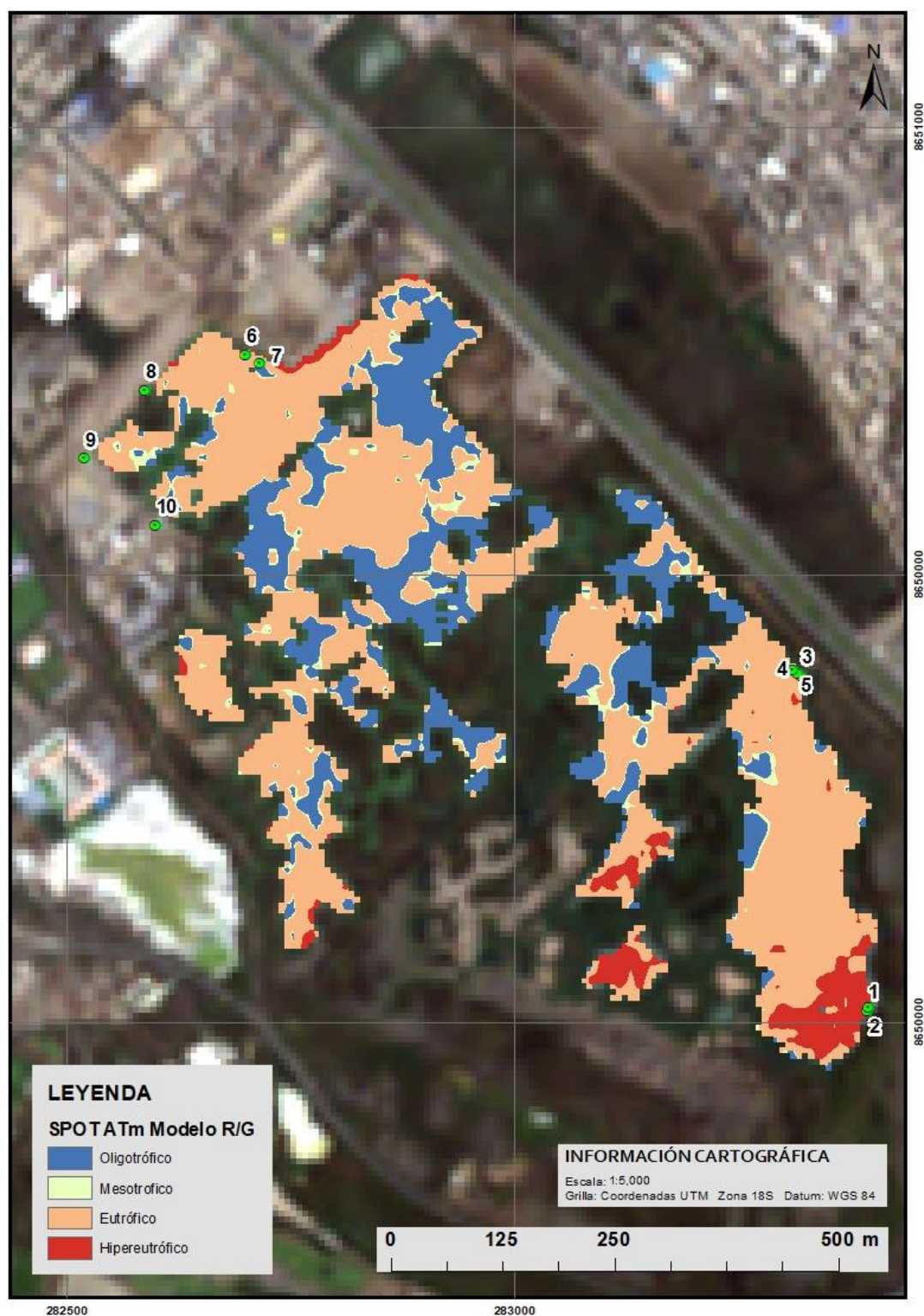


Figura 54: Mapa de estado trófico modelo R/G
 Fuente: Elaboración propia

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se ha logrado la determinación del perímetro del cuerpo de agua empleando dos satélites ópticos distintos, en el caso de las imágenes Landsat estas permiten discriminar mejor los cuerpos de agua gracias a poseer más bandas ópticas, en el caso del satélite SPOT su principal ventaja es la mayor resolución espacial que permite tener mayor nivel de detalle para realizar el cartografiado; sin embargo, al emplear únicamente índices (MNDWI, NDWI, NDWI-red) para la discriminación de superficies de agua y terrestres, ambos satélites están condicionados por la generación de falsos positivos que afectan la correcta discriminación de la superficie de agua. Por ello añadir en nuestro análisis el factor basado en la firma espectral (valores asociados a un cuerpo de agua) hemos obtenido resultados más exactos para poder definir el perímetro de cuerpo agua.
- Aplicando modelos de regresión lineal se ha logrado correlacionar la concentración de clorofila-a con valores satelitales. Los valores estadísticos más altos y significativos se obtuvieron para las imágenes del satélite SPOT con corrección atmosférica ATCOR, específicamente para tres modelos de bandas espectrales: Infrarrojo Cercano con Azul ($R^2 = 0.801$ y valor-p = 0.0065), Rojo con Azul ($R^2 = 0.882$ y valor-p = 0.0017) y Rojo con Verde ($R^2 = 0.723$ y valor-p = 0.0152). Estas correlaciones permitieron generar ecuaciones que estiman la concentración de clorofila-a para la laguna mayor en su totalidad.
- Mediante el cálculo del Estado Trófico para todo el cuerpo de agua basado en las estimaciones de concentración de clorofila-a, se evidencia que la mayor parte de la laguna se encuentra hipereutrofizada. Lo cual está de acuerdo a otros estudios realizados en la laguna en periodos de tiempo similares.

- Para la discriminación de cuerpos de agua en imágenes satelitales ópticas se recomienda incorporar el análisis de firmas espectrales ya que permite eliminar los falsos positivos generados durante el proceso, esto es de especial importancia para entidades públicas encargadas de la gestión del recurso hídrico como el ANA, además es importante realizar la verificación de los resultados a fin de verificar su idoneidad.
- Para la determinación en laboratorio de la clorofila-a se recomienda emplear el método de Jeffrey ya que es el método más utilizado y se encuentra consolidado en las guías de la EPA.
- Se recomienda que los puntos de muestreo in situ deben realizarse sobre áreas con una profundidad mínima (1 metro) tal que permita que se muestren como píxeles de agua en las imágenes satelitales.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Libros

- Barbosa, C. C. F., Novo, E. M. L. M., & Martins, V. S. (2019). *Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos: Princípios e aplicações*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Carrasco Diaz, Sergio. (2008). *Metodología de la investigación científica: pautas metodológicas para diseñar y elaborar el proyecto de investigación*. Editorial San Marcos
- Campbell, J. B., & Wynne, R. B. (2011). *Introduction to Remote Sensing*. The Guilford Press.
- Hernández Sampieri, R. & Mendoza C. (2018). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Editorial Mc Graw Hill Education
- McDonald, J.H. (2014). *Handbook of Biological Statistics*. Sparky House Publishing.

Documentos de Referencia:

- Centro de Datos para la Conservación. CDC - UNALM. *Propuesta para la designación de cuatro nuevos sitios Ramsar. Ficha Técnica: Zona Reservada Los Pantanos de Villa*. Facultad de Ciencias Forestales - Universidad Nacional Agraria La Molina, 1996, Lima, Perú.
- Cano Asunción & Kenneth Young (Editores). *Los Pantanos de Villa. Biología y Conservación*. Serie de Divulgación N° 11, Museo de Historia Natural, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 1998, Lima, Perú.
- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras. *Manual de Técnicas Analíticas para la Determinación de Parámetros Fisicoquímicos y Contaminantes Marinos*. Programa CALIDAD AMBIENTAL MARINA – CAM, INSTITUTO DE INVESTIGACIONES MARINAS Y COSTERAS José Benito Vives De Andréis – INVEMAR, 2003, Santa Marta (Colombia)
- Secretaría de la Convención de Ramsar. *Manejo de humedales: Marcos para manejar Humedales de Importancia Internacional y otros humedales*. Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales,

4ª edición, vol. 18. Secretaría de la Convención de Ramsar, 2010, Gland (Suiza).

- Secretaría de la Convención de Ramsar. (2007). Documento informativo Ramsar No. 1 ¿Qué son los humedales? www.ramsar.org
- Dirección General de Áreas Naturales Protegidas y Fauna Silvestre. *Plan maestro de la Zona Reservada de los Pantanos de Villa*. Instituto Nacional de Recursos Naturales – INRENA, 2008. Lima, Perú.

Artículos Científicos:

- Alvarez Gutierrez, C. C. (2016). Determinación Analítica De Detergentes En Las Aguas De Los Pantanos De Villa. Repositorio de Tesis - PUCP, 87.
- Arar, E. J. Method 446.0: In Vitro Determination of Chlorophylls a, b, c₁ + c₂ and Pheopigments in Marine and Freshwater Algae by Visible Spectrophotometry. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-15/005, 1997. Accesible via web en : https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NERL&dirEntryId=309415
- Bellido, J. (2019). Análisis espacio-temporal del comportamiento de la Clorofila “a” mediante imágenes satelitales en le represa Aguada Blanca para le año 2017.
- Chavez, P. S. (1988). An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. Remote Sensing of Environment, 24(3), 459-479.
- Estruch Benito, F. (2011). Análisis de la clorofila a en el agua a partir de una imagen multiespectral Quickbird en la zona costera de Gandia [Universitat Politècnica de València]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/9176>
- Ferral, A. (2012). Análisis espacio-temporal del efecto del sistema de aireación artificial en el embalse San Roque. Integración de datos de campo y técnicas geoespaciales [Universidad Nacional de Córdoba]. <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/11540>
- Gregor, J. & Marsalek, B. 2004. Freshwater phytoplankton quantification by chlorophyll a: a comparative study of in vitro, in vivo and in situ methods. Water Res., 38:517-522.

- Horritt, M. S., Mason, D. C., & Luckman, A. J. (2001). Flood boundary delineation from synthetic aperture radar imagery using a statistical active contour model. *International Journal of Remote Sensing*, 22(13), 2489–2507. <https://doi.org/10.1080/01431160116902>
- Jeffrey, S.W. and G.F. Humphrey. (1975). New Spectrophotometric Equations for Determining Chlorophylls a, b, c₁ + c₂ in Higher Plants, *Algae and Natural Phytoplankton. Biochem. Physiol.*, 167, 191-194.
- Jodłowska, S., & Latała, A. (2011). The Comparison of Spectrophotometric Method and High-Performance Liquid Chromatography in Photosynthetic Pigments Analysis. *OnLine Journal of Biological Sciences*, 11(2), 63–69. <https://doi.org/10.3844/OJBSCI.2011.63.69>
- Lencinas, J. D., & Siebert, A. (2009). Relevamiento de bosques con información satelital: Resolución espacial y escala. *Quebracho - Revista de Ciencias Forestales*, 17(1-2), 101-105.[fecha de Consulta 11 de Febrero de 2021]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=481/48113035010>
- Lorenzen, C.J., "Determination of Chlorophyll and Pheo-Pigments: Spectrophotometric Equations," *Limnol. Oceanogr.* 12, pp. 343-6.
- Marquina, Jesús, & Mogollón R., Amanda (2018). Niveles y escalas de levantamiento de información geográfica en sensores remotos. *Revista Geográfica Venezolana*, 59(1), 42-52. [fecha de Consulta 11 de Febrero de 2021]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=3477/347760307004>
- McFeeters, S. K., 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>.
- Mollaei, S. (2018). Estimation of Phytoplankton Chlorophyll-a Concentration in the Western Basin of Lake Erie Using Sentinel-2 and Sentinel-3 Data [University of Waterloo]. <https://uwspace.uwaterloo.ca/handle/10012/13456>
- Picazo, A., Rochera, C., Vicente, E., Miracle, M. R., & Camacho, A. (2013). Spectrophotometric methods for the determination of photosynthetic pigments in stratified lakes: a critical analysis based on

comparisons with HPLC determinations in a model lake. *Limnetica*, 32(32), 139–158. <https://doi.org/10.23818/limn.32.13>

- Pinckney, J., Papa, R., & Zingmark, R. (1994). Comparison of high-performance liquid chromatographic, spectrophotometric, and fluorometric methods for determining chlorophyll a concentrations in estuarine sediments. *Journal of Microbiological Methods*, 19(1), 59–66. [https://doi.org/10.1016/0167-7012\(94\)90026-4](https://doi.org/10.1016/0167-7012(94)90026-4)
- Ritchie, R. J. (2006). Consistent Sets of Spectrophotometric Chlorophyll Equations for Acetone, Methanol and Ethanol Solvents. *Photosynthesis Research* 2006 89:1, 89(1), 27–41. <https://doi.org/10.1007/S11120-006-9065-9>
- Pinto, A., Von Sperling, E., Moreira, R. Chlorophyll-a Determination Via Continuous Measurement of Plankton Fluorescence: Methodology Development. *Water Res.* 2001; 35(16):3977-3981.
- Rivera R., Carlos et al. *COMPARACIÓN DE LA ESTIMACIÓN DE LA CLOROFILA-a MEDIANTE LOS MÉTODOS ESPECTROFOTOMÉTRICO Y FLUOROMÉTRICO*. *Acta biol. Colomb.* [online]. 2005, vol.10, n.2, pp.95-103. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-548X2005000200007&lng=en&nrm=iso>.
- Rodriguez, M. (2019). Estudio de la floraciones algales mediante indicadores de concentración de Clorofila y temperatura superficial en el embalse de Condorama utilizando técnicas de Teledetección.
- Schagerl, M., & Künzl, G. (2007). Chlorophyll a extraction from freshwater algae - A reevaluation. *Biologia*, 62(3), 270–275. <https://doi.org/10.2478/S11756-007-0048-X/MACHINEREADABLECITATION/RIS>
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Yan, D., Wang, X., Zhu, X., Huang, C., & Li, W. (2017). Analysis of the use of NDWIgreen and NDWIred for inland water mapping in the Yellow River Basin using Landsat-8 OLI imagery. *Remote Sensing Letters*, 8(10), 996–1005. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2017.1341664>

Tesis:

- Moschella Miloslavich. 2012. *Variación y Protección de Humedales Costeros Frente a Procesos de Urbanización: Casos Ventanilla y Puerto Viejo*, Tesis de Maestría. Lima, Perú. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Pérez Ortega, M. 2011. *Aplicaciones de la Teledetección y SIG en la caracterización de humedales en la Reserva de la Biosfera de la Mancha Húmeda*. Trabajo Fin de Master. Madrid, España. Universidad Complutense de Madrid.
- Alejandro Cabello Pasini, Víctor Macías Carranza, 2011. PROPIEDADES ÓPTICAS DE LAS HOJAS DE VID: REFLECTANCIA, TRANSMITANCIA, ABSORPTANCIA Y CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA, Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California, A.P. 453. 22800. Ensenada, Baja California (acabello@uabc.edu.mx).

Anexo 1: Ficha Técnica de Firma Espectral



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, Decana de América)
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS
LABORATORIO DE FÍSICA DE LA TIERRA – LABFIT

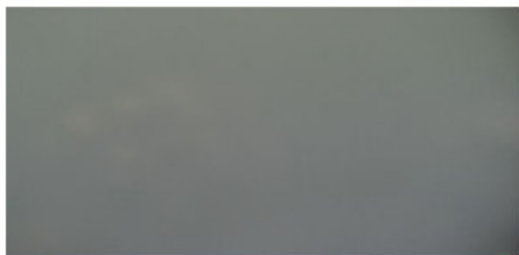
FICHA TÉCNICA DE FIRMA ESPECTRAL

Nº: 0006

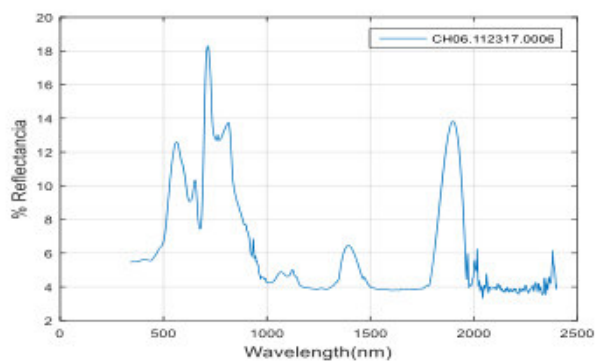
1. Del Instrumento:

Fecha/ hora:	23/11/17 10:31:50	Instrumento s/n:	HR-1024i 8162077
Lente:	LEN 4	Panel de Ref. s/n:	99AA03-0816-6320
Operador:		Entidad:	LABFIT-FCF-UNMSM

2. De la cobertura:

Tipo de cobertura:	Agua	Nombre Archivo:	CH005.112317.0006
Ubicación:	Dep: Lima	Prov: Lima	Dist: Chorrillos
Coordenadas:	Lat:	Lon:	
Descripción: Agua de Humedal		Fotografía:	
			

Firma Espectral:




UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, Decana de América)
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS
LABORATORIO DE FÍSICA DE LA TIERRA – LABFIT
Reflectancia espectral desde 350 – 2500 nm ($\Delta\lambda = 3 \text{ nm}$)

339	0.89	438	1.79	537	5.2	636	3.22	735	24.36
342	0.86	441	1.81	540	5.29	639	3.14	738	26.38
345	0.86	444	1.84	543	5.38	642	3.05	741	28.17
348	0.88	447	1.87	546	5.41	645	2.95	744	29.7
351	0.88	450	1.91	549	5.51	648	2.87	747	31.04
354	0.87	453	1.94	552	5.55	651	2.83	750	32.09
357	0.88	456	1.96	555	5.55	654	2.78	753	32.95
360	0.9	459	1.98	558	5.49	657	2.72	756	33.6
363	0.89	462	1.99	561	5.38	660	2.66	759	34.16
366	0.89	465	2.01	564	5.24	663	2.58	762	35.12
369	0.89	468	2.02	567	5.06	666	2.53	765	35.26
372	0.9	471	2.02	570	4.85	669	2.45	768	35.26
375	0.91	474	2.04	573	4.64	672	2.44	771	35.36
378	0.92	477	2.05	576	4.46	675	2.44	774	35.51
381	0.95	480	2.06	579	4.31	678	2.47	777	35.64
384	0.97	483	2.07	582	4.19	681	2.52	780	35.75
387	1	486	2.09	585	4.1	684	2.62	783	35.89
390	1.04	489	2.12	588	4.04	687	2.83	786	36.01
393	1.09	492	2.16	591	3.98	690	3.13	789	36.12
396	1.14	495	2.21	594	3.94	693	3.55	792	36.23
399	1.18	498	2.28	597	3.91	696	4.17	795	36.32
402	1.24	501	2.38	600	3.87	699	4.92	798	36.4
405	1.3	504	2.5	603	3.83	702	5.83	801	36.49
408	1.36	507	2.64	606	3.76	705	6.78	804	36.61
411	1.43	510	2.82	609	3.67	708	7.83	807	36.63
414	1.48	513	3.03	612	3.58	711	8.97	810	36.72
417	1.54	516	3.3	615	3.48	714	10.3	813	36.87
420	1.6	519	3.62	618	3.4	717	11.83	816	36.99
423	1.64	522	3.93	621	3.34	720	13.88	819	37.07
426	1.68	525	4.27	624	3.31	723	15.67	822	37.12
429	1.72	528	4.55	627	3.29	726	17.86	825	37.08
432	1.74	531	4.84	630	3.28	729	20.1	828	37.11
435	1.77	534	5.05	633	3.27	732	22.34	831	37.13


UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, Decana de América)
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS
LABORATORIO DE FÍSICA DE LA TIERRA – LABFIT

834	37.1	933	36.25	1032	35.71	1131	33.96	1230	28.55
837	37.14	936	35.89	1035	35.88	1134	33.34	1233	28.65
840	37.12	939	36.21	1038	36.04	1137	32.74	1236	28.75
843	37.13	942	35.85	1041	36.21	1140	32.18	1239	28.85
846	37.17	945	35.38	1044	36.34	1143	31.37	1242	28.96
849	37.22	948	35.34	1047	36.48	1146	30.57	1245	29.05
852	37.22	951	35.02	1050	36.62	1149	29.87	1248	29.14
855	37.19	954	34.06	1053	36.73	1152	29.34	1251	29.23
858	37.21	957	33.96	1056	36.88	1155	28.94	1254	29.32
861	37.49	960	33.99	1059	36.98	1158	28.62	1257	29.38
864	37.3	963	33.59	1062	37.06	1161	28.4	1260	29.43
867	37.42	966	33.33	1065	37.13	1164	28.24	1263	29.46
870	37.35	969	33.31	1068	37.18	1167	28.13	1266	29.47
873	37.57	972	33.2	1071	37.23	1170	28.07	1269	29.46
876	37.49	975	33.19	1074	37.25	1173	28.01	1272	29.41
879	37.45	978	33.12	1077	37.26	1176	27.96	1275	29.34
882	37.67	981	33.12	1080	37.26	1179	27.9	1278	29.27
885	37.47	984	33.18	1083	37.24	1182	27.86	1281	29.2
888	37.61	987	32.98	1086	37.2	1185	27.82	1284	29.12
891	37.43	990	32.98	1089	37.16	1188	27.78	1287	29.04
894	37.58	993	33.1	1092	37.11	1191	27.76	1290	28.9
897	37.66	996	33.26	1095	37.05	1194	27.75	1293	28.74
900	37.72	999	33.5	1098	36.98	1197	27.74	1296	28.56
903	37.6	1002	33.66	1101	36.91	1200	27.77	1299	28.35
906	37.55	1005	33.85	1104	36.81	1203	27.82	1302	28.11
909	37.6	1008	34.05	1107	36.71	1206	27.88	1305	27.84
912	37.65	1011	34.24	1110	36.61	1209	27.95	1308	27.55
915	37.68	1014	34.45	1113	36.47	1212	28.01	1311	27.23
918	37.48	1017	34.62	1116	36.33	1215	28.1	1314	26.87
921	37.41	1020	34.85	1119	36.12	1218	28.15	1317	26.46
924	37.33	1023	35.1	1122	35.77	1221	28.23	1320	26.09
927	37.29	1026	35.32	1125	35.25	1224	28.33	1323	25.72
930	36.85	1029	35.52	1128	34.64	1227	28.44	1326	25.32

Anexo 2: Materiales de laboratorio



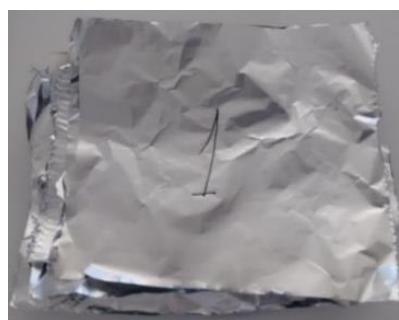
Embudo de filtración magnética



Papel filtro Whatman de 25 mm de diámetro



Pinza



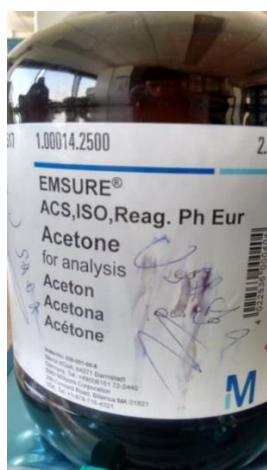
Papel aluminio



Probeta



Hielo

**Cooler****Centrífuga de laboratorio****Acetona 90 %****Sonic Vibra Cell****Espectrofotómetro****Congeladora**

Anexo 3: Procedimiento de Laboratorio (fotografías)

Acomodar correctamente el papel filtro usando la pinza



Fotografía 8: Colocación del papel filtro

Colocar el embudo



Fotografía 9: Preparación del embudo

Medir la cantidad de muestra para filtrar en la probeta



Fotografía 10: Medición de la muestra

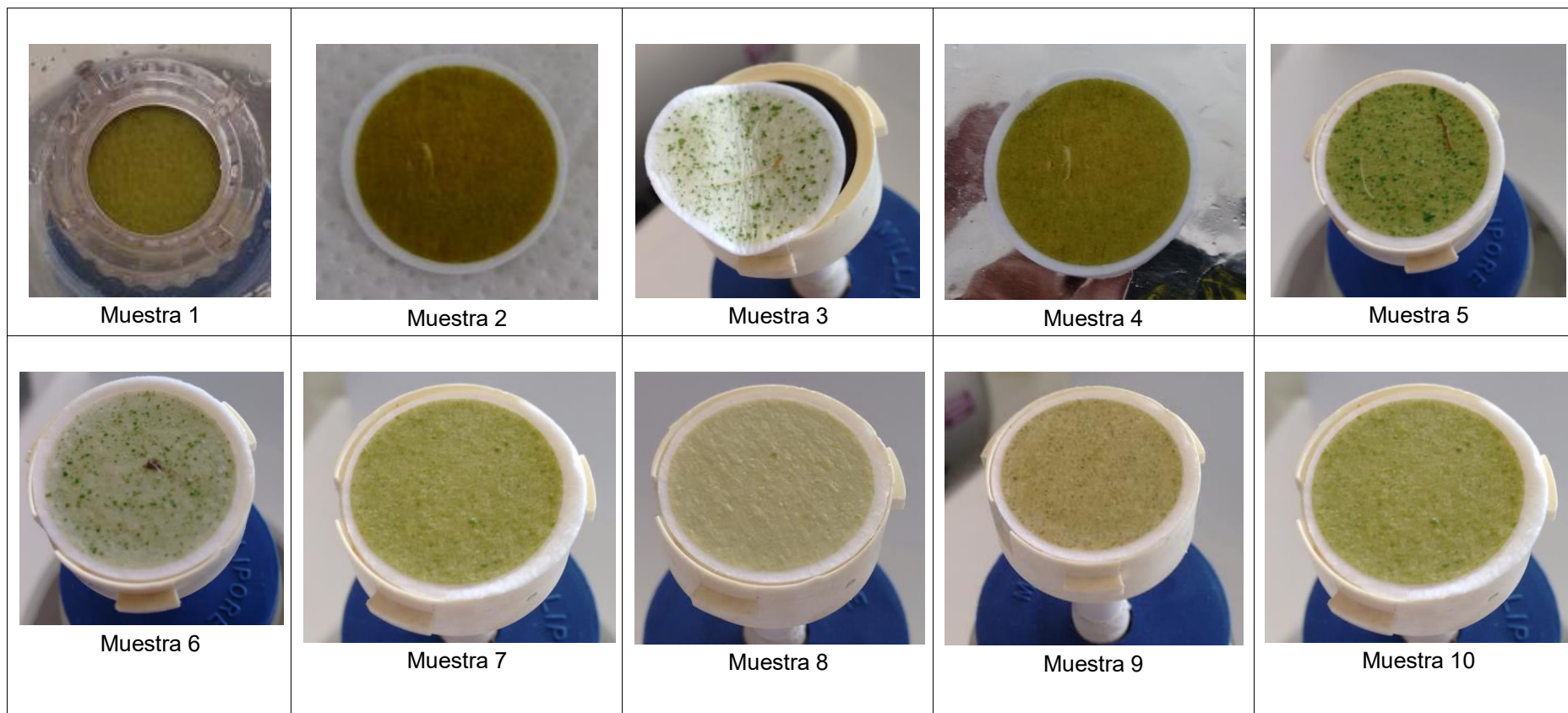
Se filtró la muestra medida



Fotografía 11: Filtración de la muestra

Las 10 muestras fueron filtradas en el embudo de filtración electrónico, el mismo procedimiento se hizo para todas.

A continuación, fotografías obtenidas de las muestras de pigmentos en el papel filtro.



Fotografía 12: Muestras en papel filtro

Secados los filtros mediante la succión y con ayuda de una pinza, fueron retirados del embudo y envueltos en papel aluminio para luego ser almacenados en la congeladora a -20°C .



Fotografía 13: Ingreso de la muestras al congelador luego del filtro

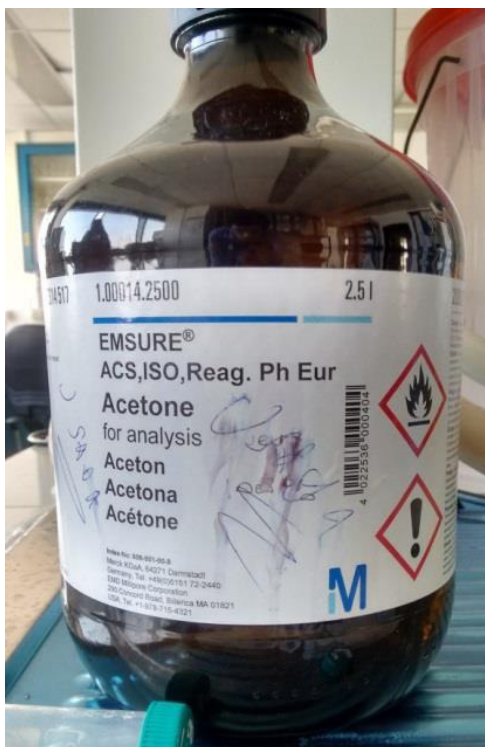


Fotografía 14: Congelador que se utilizó en el proceso

Medición de la clorofila A

Colocamos el filtro que contiene la muestra concentrada del pigmento en un tubo de centrífuga.

Agregamos 10 ml de solución acuosa de acetona 90 % tapar firmemente.



Fotografía 15: Acetona 90 %



Fotografía 16: Preparación de la muestra en tubos con acetona al 90%

Repetimos este proceso para las 10 muestras a analizar

Retirar ahora las tapas de las muestras y so

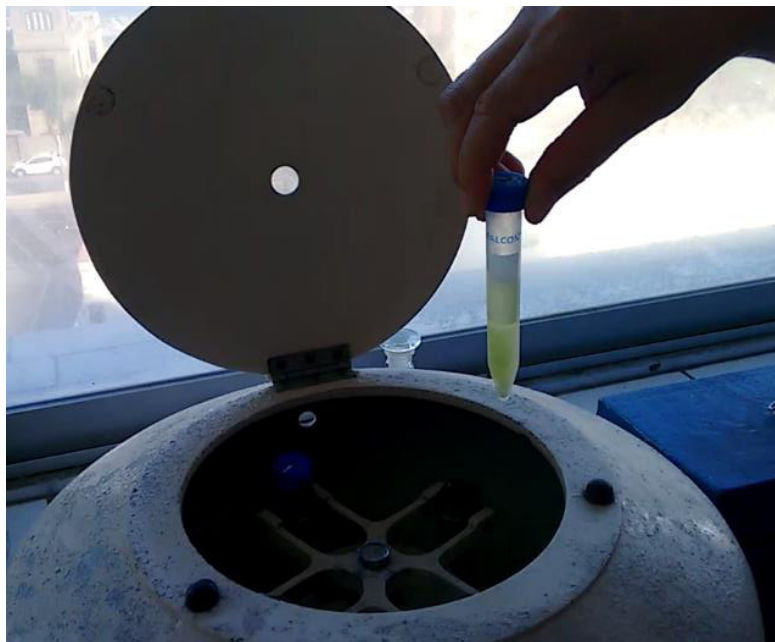
nicar con la micro-punta durante 20 segundos en el tubo que contiene la acetona acuosa y el filtro concentrado. Este paso se repite para todas las muestras.



Fotografía 17: Equipo para emitir sonidos en las muestras

Centrifugado

Colocamos todas las muestras en los tubos para que puedan ser centrifugados

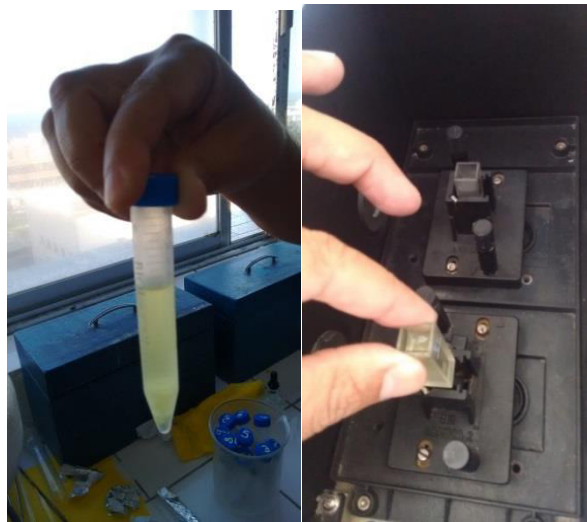


Fotografía 18: Centrifuga



Fotografía 19: Muestras centrifugadas

Tenemos ahora las muestras homogeneizadas y seguidamente colocamos una a una en la cubeta espectrofotométrica del espectrofotómetro.



Fotografía 20: Cubeta espectrofotométrica

Anexo 4: Código para la regresión lineal

El código fue desarrollado en el lenguaje de programación R y ejecutado mediante la interfaz Rstudio

```

1  # Cargar el paquete ggplot2
2  library(ggplot2)
3
4  #direccion
5  setwd("I:/Material jq/TESIS_SIG/Regresion/prueba")
6  dir()
7
8  # Cargar los datos
9  archivo<-file.choose()
10 datos <- read.table(archivo, header = TRUE)
11
12 #Añadir ratios derivados de la data original
13 datos$'NIR-R' <- datos$NIR-datos$R
14 datos$'NIR-G' <- datos$NIR-datos$G
15 datos$'NIR-B' <- datos$NIR-datos$B
16 datos$'R-NIR' <- datos$R-datos$NIR
17 datos$'R-G' <- datos$R-datos$G
18 datos$'R-B' <- datos$R-datos$B
19 datos$'G-B' <- datos$G-datos$B
20
21 datos$'NIR/R' <- datos$NIR/datos$R
22 datos$'NIR/G' <- datos$NIR/datos$G
23 datos$'NIR/B' <- datos$NIR/datos$B
24 datos$'R/NIR' <- datos$R/datos$NIR
25 datos$'R/G' <- datos$R/datos$G #existente en la literatura
26 datos$'R/B' <- datos$R/datos$B
27 datos$'G/NIR' <- datos$G/datos$NIR
28 datos$'G/R' <- datos$G/datos$R
29 datos$'G/B' <- datos$G/datos$B
30 datos$'B/NIR' <- datos$B/datos$NIR
31 datos$'B/R' <- datos$B/datos$R
32 datos$'B/G' <- datos$B/datos$G #existente en la literatura
33
34 # Obtener la variable dependiente (Y) y las variables independientes (X)
35 Y <- datos[, 1] # Primera columna es la variable dependiente
36 X <- datos[, -1] # Las demás columnas son las variables independientes
37
38 # Crear una matriz para almacenar los resultados de la regresión
39 resultados <- matrix(NA, nrow = ncol(X), ncol = 4,
40                     dimnames = list(names(X), c("Intercepto", "Pendiente", "R cuadrado", "Valor p")))
41
42 # Crear una lista para almacenar los gráficos de regresión

```

```

43 graficos <- list()
44
45 # Ajustar un modelo de regresión y generar el gráfico para cada columna independiente
46 for (i in 1:ncol(X)) {
47   modelo <- lm(Y ~ X[, i]) # Modelo de regresión lineal
48
49   # Guardar los resultados en la matriz
50   resultados[i, "Intercepto"] <- coef(modelo)[1]
51   resultados[i, "Pendiente"] <- coef(modelo)[2]
52   resultados[i, "R cuadrado"] <- summary(modelo)$r.squared
53   resultados[i, "Valor p"] <- summary(modelo)$coefficients[2, 4]
54
55   # Crear el gráfico de regresión utilizando ggplot2
56   grafico <- ggplot(datos, aes(x = X[, i], y = Y)) +
57     geom_point() + # Agregar puntos de los datos
58     geom_smooth(method = "lm", se = FALSE) + # Agregar línea de regresión. false no se muestra
59     labs(x = colnames(X)[i], y = "Clorofila-A (µg/l)") +
60     geom_text(aes(x = max(X[, i]), y = max(Y), label = paste("Y =", round(resultados[i, 1], 2), " + ",
61       round(resultados[i, 2], 2), "X")),
62       hjust = 1, vjust = 18) + # Agregar ecuación de regresión
63     annotate("text", x = max(X[, i]), y = max(Y), label = paste("R² =",
64       round(summary(modelo)$r.squared, 2)),
65       hjust = 1, vjust = 20) + # Agregar R cuadrado
66     geom_segment(aes(x = max(X[, i]), xend = max(X[, i]), y = max(Y), yend = max(Y) - 8), color =
67     "black") + # Agregar línea de separación
68     theme_minimal() + # Estilo del gráfico
69     scale_y_continuous(limits = c(0, max(Y)+100)) # Limitar el eje Y a valores positivos
70
71   # Guardar el gráfico en la lista
72   graficos[[i]] <- grafico
73 }
74
75 # Mostrar la tabla de resultados
76 print(resultados)
77
78 # Extraer nombres para archivos de salida
79 bn<-substr(basename(archivo), 1, nchar(basename(archivo)) - 4)
80 print(bn)
81 nn<-paste0(bn,"_stats.csv")
82
83 # Exportar los resultados como un archivo CSV (cambiar el nombre del archivo según corresponda)
84 write.csv(resultados, nn, row.names = TRUE)
85
86 # Mostrar los gráficos de regresión y exportarlos como imágenes PNG
87 for (i in 1:length(graficos)) {
88   print(graficos[[i]])
89 }
90

```

```
87 # Obtener el nombre de la columna
88 nombre_columna <- colnames(X)[i]
89
90 # Exportar el gráfico como imagen PNG (cambiar el nombre del archivo según corresponda)
91 ggsave(paste(bn,"_", nombre_columna, ".png", sep = ""), plot = last_plot(), width = 8, height = 6,
92 dpi = 300)
93 }
```