

INFORME FINAL

TURBERAS DE CHILOÉ

JOHN TREIMUN

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	2
2. MARCO CONCEPTUAL	3
3. METODOLOGÍA.....	7
3.1. Trabajo en gabinete	7
3.2. Levantamiento de la información en terreno	8
3.2.1. Campaña de levantamiento de información en las turberas.....	8
3.3. Integración de la información recopilada en terreno con la información satelital	9
4. RESULTADOS	10
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	17
6. BIBLIOGRAFÍA	18
7. ANEXOS	0

1. INTRODUCCIÓN

La Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) tiene por objeto ejecutar, organizar y coordinar el seguimiento y fiscalización de las Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA) y de todos aquellos otros instrumentos de carácter ambiental que establezca la ley, promoviendo e incentivando el cumplimiento de los sujetos regulados, aplicando sanciones en caso de infracciones a cuerpos normativos.

En esta línea, el Departamento de Gestión de la Información de la SMA, ha desarrollado el Programa de Monitoreo Ambiental Territorial (PMAT), cuya finalidad es fortalecer la capacidad fiscalizadora y la eficiencia en el uso de los recursos humanos y tecnológicos, a través del uso de los usos de técnicas y métodos de percepción remota. En su primera versión, el PMAT incluyó el desarrollo de un conjunto de variables físicas e índices espectrales de interés para las labores de la SMA, entre los cuales se encontraban la temperatura superficial del mar, la clorofila a, los sólidos en suspensión, la turbidez superficial del mar, el albedo de los cuerpos glaciares, entre otras de interés para la institución.

La propuesta metodológica del actual estudio ha sido producto de las reuniones de trabajo con la contraparte. Se han decidido en esas sesiones de trabajo los métodos, variables y ambientes que serían caracterizados y utilizados como base para la calibración de algunos modelos relacionados con variables físicas de importancia. De esta forma, se ha determinado realizar una caracterización de las turberas de Chiloé, zonas naturales de gran relevancia para los procesos ecosistémicos integrales, tales como el ciclo de CO₂, así como también del ambiente marino costero de Chiloé oriental y del litoral central.

Los datos recolectados serán utilizados para la calibración de modelos automatizados, basados en la imágenaría satelital de Landsat, MODIS y Sentinel, entre otros, con el fin de establecer un monitoreo permanente y continuo del territorio nacional. Se ha determinado trabajar con el análisis de regresión, en sus formas lineales y no lineales, para la calibración y ajuste de los modelos base del PMAT, incorporando una nueva visión, la que integra la medición de las variables de forma directa, in situ, permitiendo un manejo flexible, eficiente y operativo de las campañas de terreno.

A continuación, se describen los principales aspectos conceptuales, metodológicos y los resultados obtenidos en el estudio de las turberas de Chiloé, logrando incorporar un nuevo algoritmo y ambiente en la composición del PMAT.

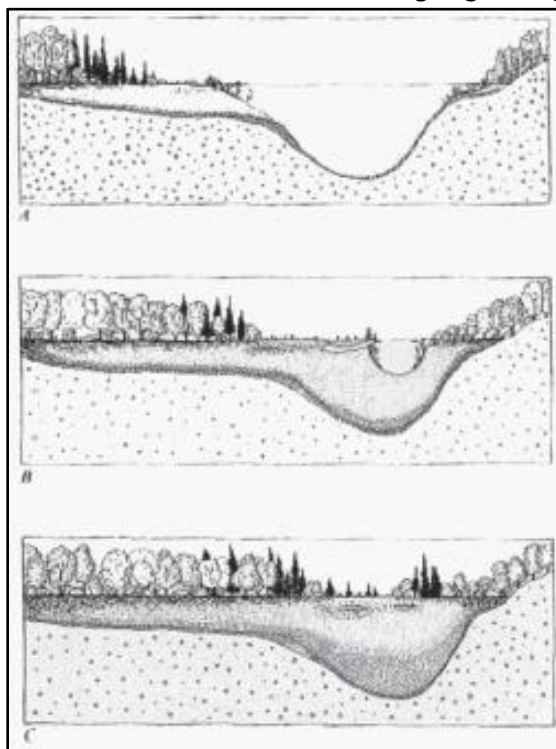
2. MARCO CONCEPTUAL

El término turba debe ser entendido como un sedimento natural de tipo fitógeno, poroso, no consolidado, constituido por materia orgánica parcialmente descompuesta, acumulada en un ambiente saturado de agua. De esta forma, se puede entender al concepto de *turbera* como un depósito de turba con un espesor de, al menos, 30 cm (Hauser, 1996)

Según Hauser (1996), el origen de las turberas se encuentra en las eras glaciares del Pleistoceno, cuando grandes extensiones de casquetes glaciares cubrieron el valle central de la Región de Los Lagos, incluyendo a la Isla Grande de Chiloé. El posterior retiro de los glaciares dejó masas de agua tierra adentro, formando los grandes lagos y lagunas glaciares que en la actualidad componen el paisaje de la región.

En el caso de Chiloé, zona en la que se establecieron las condiciones climáticas ideales para el desarrollo del musgo del género *Sphagnum*, lo que permitió la acumulación de materia orgánica en depresiones del relieve de la isla con alto contenido de humedad (Figura 1A). Este proceso de acumulación del musgo se consolidó en la formación de extensas turberas (Figura 1B y 1C) (Hauser, 1996).

Figura 1. Proceso de formación de turberas de origen glaciar (caso de Chiloé).



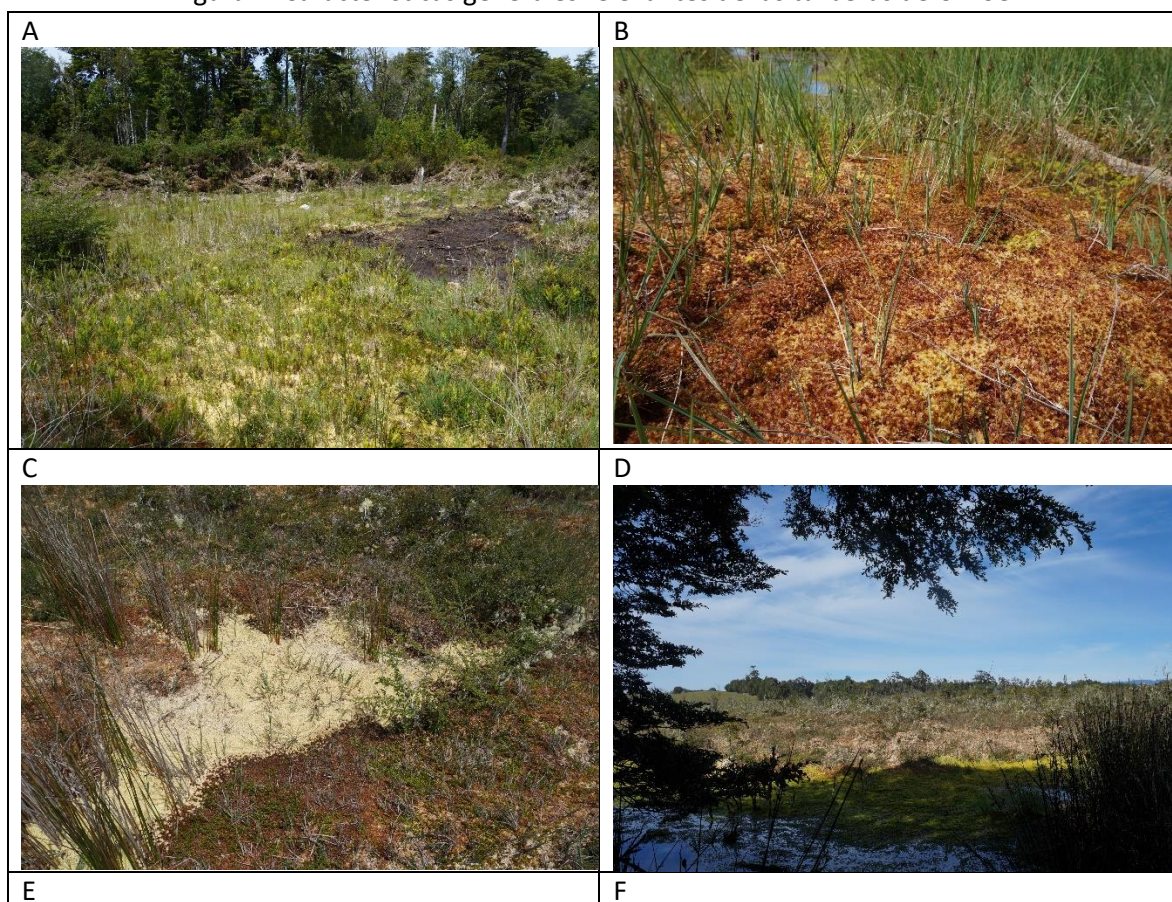
Fuente: Schofield, 1985¹

¹ Modelo de formación de turberas (Schofield, 1985), en Zegers, G. Larraín, J. Díaz. F. & JJ. Armesto. 2006. Impacto ecológico y social de la explotación de pomponales y turberas de *Sphagnum* en la Isla Grande de Chiloé. Revista Ambiente y Desarrollo (Chile) 22: 28-34.

Una de las características relevantes de las turberas de *Sphagnum* es que presenta una matriz continua superficial de musgos sobre una capa de turba que puede alcanzar varios metros de profundidad (Díaz et al., 2008). Según el mismo autor, entre otras características relevantes de este tipo de turberas se encuentran:

- La turba que la compone es de origen vegetal y se encuentra en distintos estados de descomposición anaeróbica (Figura 2).
- El estrato superficial es biológicamente activo, conformado por asociaciones de especies, entre las que predominan plantas con gran capacidad para retener humedad (Figura 2B).
- El musgo *Sphagnum* forma un ambiente pobre en nutrientes (baja concentración de nitrógeno), ácido, anóxico y frío, lo que previene la presencia de hongos y bacterias que descomponen al material muerto (Figura 2C).
- Tiene una gran capacidad de absorción de agua (hasta 20 veces su peso seco en agua) (Figura 2E).
- Su fuente de agua proviene de ríos y/o de la lluvia (Figura 2D).
- Es un ecosistema de humedal con flora y fauna única y especializada (Figura 2F).

Figura 2. Características generales relevantes de las turberas de Chiloé.





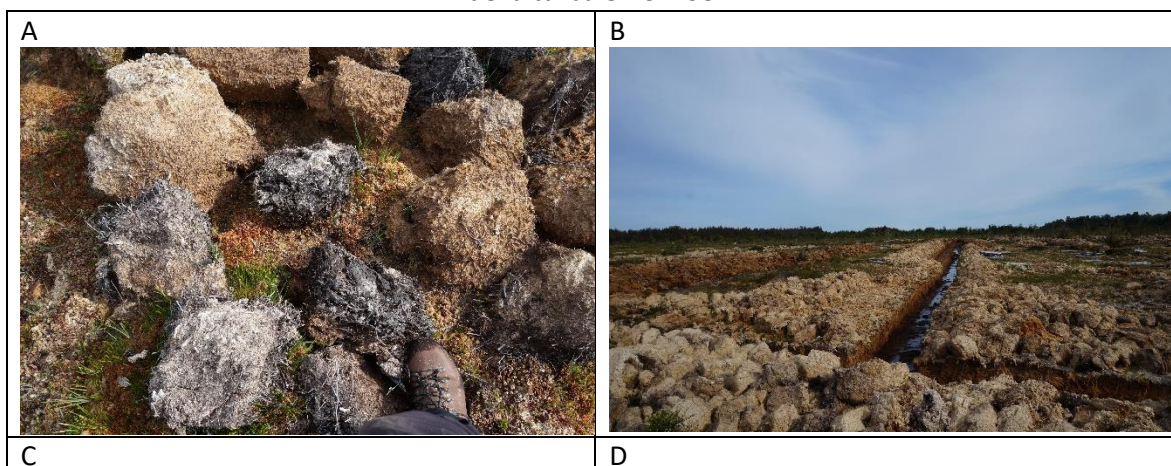
Elaboración propia.

En relación a la explotación de la turba como recurso natural, en Chile la extracción de turba corresponde a una actividad minera regulada, por lo que los proyectos de inversión deben realizar estudios detallados de su impacto ambiental, respetando el marco de la normativa (Ley N° 19.300). No obstante, en la campaña de terreno realizada se pudo comprobar que existe extracción ilegal en diferentes zonas de Chiloé, existiendo diversos tipos de extracción e intervención (Figura 3 A Y B).

Las turberas son drenadas y volteadas usando retroexcavadoras para luego extraer con mayor facilidad la turba (Figura 3C) o construyendo en forma artesanal una red de canales de drenaje y secado (Figura 3D), eliminando por completo la cubierta vegetal y afectando directamente a la biodiversidad. Posteriormente, estos pompones de turba o la turba volteada en el proceso industrializado, son secados y ensacados para su almacenamiento y distribución a los puertos cercanos (Figura 3 E y F).

Estas acciones dificultan la regeneración de la turbera, dejando el sustrato mineral expuesto en la superficie. No obstante, cabe mencionar que, en países con una industria desarrollada basada en la turba, como Canadá, se restauran los sistemas ecológicamente balanceados en periodos de 5 a 20 años, siguiendo planes de manejo adecuados en cada ecosistema (Valenzuela & Schllatter, 2002).

Figura 3. Métodos artesanales e industriales de extracción, secado, almacenamiento y distribución de la turba en Chiloé.

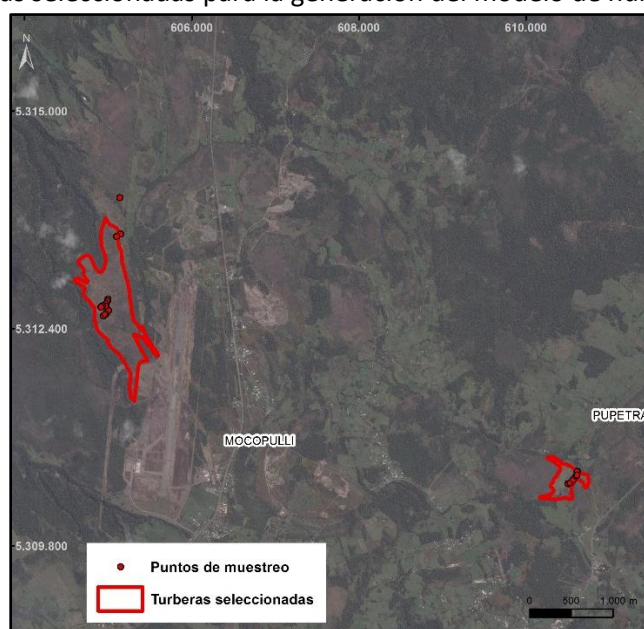




Elaboración propia.

En el caso del presente estudio, se visitaron tres turberas del tipo *Sphagnum* en Chiloé (Figura 4): la primera se localiza en el sector de Hacienda Darwin, cercana a la ciudad de Ancud, la segunda se encuentra en la localidad de Mocopulli y la tercera en las cercanías de la localidad de Pupetra.

Figura 4. Turberas seleccionadas para la generación del modelo de humedad superficial.



Elaboración propia. Sist. Coord.: WGS 1984, UTM, H 18 S.

En los tres ambientes se pudo apreciar un comportamiento diferenciado de la humedad y temperatura superficial del musgo, debido al tipo de turbera, el estado de desarrollo del musgo y el grado de intervención humana. En los siguientes apartados se presentan los detalles metodológicos seguidos para realizar la integración de la información recopilada en las campañas de terreno y la proveniente de la imagerie satelital.

3. METODOLOGÍA

La estructura metodológica del estudio de las turberas de Chiloé se dividió en tres etapas secuenciales: la caracterización en gabinete de las turberas en Chiloé y la planificación del terreno, el levantamiento de la información en las turberas seleccionadas y la integración de la información recopilada en las campañas con la información satelital correspondiente a Landsat 8. Los detalles de cada etapa se describen a continuación.

3.1. Trabajo en gabinete

Mediante la realización de una serie de reuniones de trabajo con la contraparte (3 sesiones), se procedió a la determinación de los ambientes y lugares que se considerarían para el levantamiento de la información en terreno. Se seleccionaron las turberas de la Provincia de Chiloé, perteneciente a la Región de Los Lagos, utilizando como insumos a las siguientes coberturas:

- Cartografía de Ocupación de la Tierra (MMA, 2014)². Cobertura conformada por la integración de diferentes cubiertas y usos del suelo, recopilados de diferentes estudios, proyectos y trabajos académicos, tales como el Catastro Forestal de CONAF (diferentes temporalidades a nivel nacional), las manchas urbanas del MINVU (2012), Infraestructura vial del MOP, entre otras. De esta cobertura se extrajo la sub clase denominada “Turberas”, cuyos polígonos fueron filtrados y seleccionados mediante un análisis espacial.
- Red Aislamiento e Infraestructura Vial (SUBDERE, 2012). Cobertura con el detalle de la red de vías terrestres y marítimas del país, además del detalle del tipo de carpeta y tiempo de desplazamiento por cada tramo. De esta cobertura se extrajeron las carreteras, rutas y vías marítimas que interconectan la red de turberas de Chiloé, seleccionado aquellas turberas que se encuentran a menos de 500 metros de una vía de hormigón o asfalto.

De igual forma, se estableció trabajar en base a la imagerie satelital provista por Landsat 8, debido a la logística de terreno que condicionó al presente estudio. Entre las características de la imagen satelital consideradas en la modelación de las variables seleccionadas en las turberas de Chiloé se encuentran:

- La resolución espacial (tamaño del pixel) de la imagen satelital utilizada es de 30 metros.

² <http://www.esri.cl/emailing/2015/usuarios-2015/presentaciones/29-09/Salon-IV/COT-Reunion-ESRI-Jorge-Herreros-MMA.pdf>

- Se utilizaron las bandas espectrales de la región del espectro visible (Blue, Green y Red), el infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR).
- Se utilizó una imagen coincidente con la campaña de terreno (30 de diciembre de 2016), realizando el muestreo en la ventana horaria coincidente con la pasada del sensor en la zona (11:30 AM – 12:30 PM).

Además, se establecieron dos criterios para la selección de las turberas que se considerarían en el muestreo:

- Turberas: usando como referencia a la cobertura con los usos del suelo del COT (MMA), se seleccionaron las turberas que se localizan a menos de 500 metros de una vía con carpeta de hormigón o asfalto (carreteras y rutas principales).
- De este primer grupo se escogió aquellas con más de 90.000 metros cuadrados de superficie (100 pixeles Landsat).

Se seleccionaron las turberas cercanas a la Hacienda Darwin (cercana a Ancud), así también como las cercanas a las localidades de Mocopulli y Pupetra. Tan solo en las dos últimas turberas fue posible realizar mediciones en terreno, las que fueron posteriormente cotejadas con la información satelital recopilada.

3.2. Levantamiento de la información en terreno

Se escogieron un grupo de variables relacionadas con el estado de las turberas seleccionadas para el presente proyecto. En el Cuadro 1 se sintetizan las variables propuestas para cada ambiente, además de la información de los sensores o instrumentos que utilizados en el levantamiento de la información en terreno.

Cuadro 1: Variables, sensores o instrumentos propuestos para el levantamiento de información en terreno.

Ambiente	Variables	Sensores/Instrumentos
Turberas	<ul style="list-style-type: none"> • Humedad del suelo • Temperatura del Suelo 	<ul style="list-style-type: none"> • Higrómetro • Termómetro infrarrojo Laser

Elaboración propia.

El plan de trabajo en terreno se dividió en dos partes: en la primera se diseña el levantamiento de la información relativa al ambiente de turberas. Para ambas partes se han desarrollado fichas de observación en terreno, las que permitirán la recopilación sistematizada de la información relevante (Ver Anexo). A continuación, se describen los detalles de ambas campañas.

3.2.1. Campaña de levantamiento de información en las turberas

En el ambiente de turberas se seleccionaron inicialmente 13 cuerpos naturales que cumplían los requisitos y criterios impuestos por el diseño muestral. Sin embargo, los condicionamientos impuestos por la baja accesibilidad en cada turbera, el escaso margen de la ventana temporal dada por el satélite (Landsat 8), la disminución del equipo de participantes en la campaña de terreno y el

bajo número de sensores, motivaron que se ajustaran los parámetros y número de puntos de muestreo que se consideraron finalmente. El número de mediciones y cuerpos visitados dependió de la accesibilidad y las condiciones climáticas. En el Cuadro 2 se resumen algunos parámetros generales de la campaña de terreno.

Cuadro 2: Parámetros relevantes para el levantamiento de información en terreno.

Días de campaña turberas Chiloé	Recorrido (km)	Número de mediciones	Numero de cuerpos visitados
1,5	200 km	25	3

Elaboración Propia.

3.3. Integración de la información recopilada en terreno con la información satelital

La integración de la información se realizó mediante el análisis de regresión múltiple. Este consistió en la agregación de las bandas e índices espectrales que presentaron mejor ajuste estadístico. Se probaron diferentes combinaciones e índices espectrales, seleccionando finalmente las bandas espectrales que mejor correlación presentaban, incluyendo índices espectrales que ayudan en la espacialización de la humedad en las turberas.

Para ello se realizó una serie de procedimientos de selección de las bandas espectrales y variables que se utilizarían en la modelación de la humedad superficial de las turberas cercanas a Mocopulli y Pupetra. Entre los procesos que se realizaron para determinar las variables del modelo final, construido a partir de la información levantada en terreno y la aportada por Landsat 8, se encuentran:

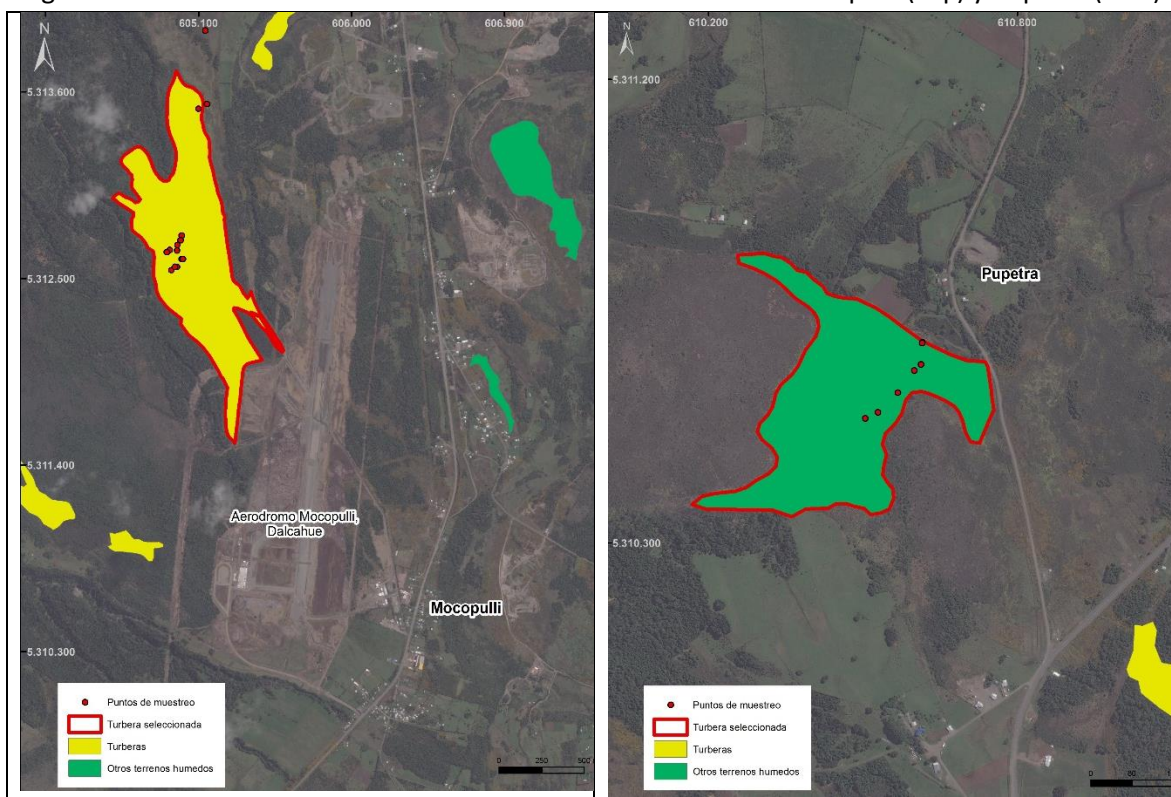
- Espacialización de los registros levantados en terreno (generación de capa vectorial de puntos atributados).
- Obtención de la imagen satelital (USGS) y procesamiento de sus bandas espectrales (corrección geométrica y topográfica, además de la obtención de la radiancia y reflectancia espectral de la superficie terrestre).
- Obtención de los índices espectrales considerados para la evaluar la influencia de la vegetación (*Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI) y del agua superficial (*Normalized Difference Water Index*, NDWI).
- Atribución de la capa de puntos con la reflectancia y los índices espectrales.
- Análisis de correlación entre la humedad superficial medida en terreno, las reflectividades e índices espectrales.
- Análisis de regresión multivariado y construcción del modelo de humedad superficial.

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos de la integración de la información recopilada en terreno y la provista por Landsat 8 permitieron modelar el comportamiento de la humedad en un suelo cubierto por el musgo *Sphagnum*, considerando diferentes estados de descomposición anaeróbica y conservación ecológica. Se consideraron las turberas cercanas a las localidades de Mocopulli y Pupetra, ambas con presencia de la turba característica, pero con diferentes grados de intervención humana.

En la Figura 5 se pueden apreciar las localizaciones de las turberas de Mocopulli y Pupetra seleccionadas en el presente estudio. Cabe observar que según el COT del MMA, la turbera cercana a Pupetra correspondería a un humedal u “otros terrenos húmedos”, lo que se contradice en parte con lo registrado en terreno (Figura 2B y 2D).

Figura 5. Turberas seleccionadas localizadas en las cercanías de Mocopulli (Izq.) y Pupetra (Der.).



Elaboración propia. Sist. Coord.: WGS 1984, UTM, H 18 S.

Los registros obtenidos para las variables seleccionadas en la caracterización de las turberas de Mocopulli y Pupetra se encuentran sintetizados en el Cuadro 3, en el que se incluyen las localizaciones de los puntos en los que se realizó el muestreo, junto a los registros medidos de la humedad del suelo y su temperatura (superficial y a 15 cm de profundidad).

El número menor de registros levantados en el sector de Pupetra se encuentra asociado a la dificultad de acceder a los sitios de la turbera que permitieran tomar más datos con una adecuada representatividad espacial, considerando la resolución espacial de Landsat 8 (30 m).

Cuadro 3. Resultados obtenidos en el muestreo de las turberas seleccionadas en Chiloé.

Turbera	Localización muestreo		H°_del suelo (%)	T Superficie (°C)	T Sonda (°C) (15 cm profundidad)
	Oeste	Sur			
Mocopulli	605.000	5.312.615	11,90	20,90	14,30
	605.007	5.312.615	11,58	18,70	10,50
	604.973	5.312.568	8,30	17,40	14,00
	604.940	5.312.548	10,80	19,90	11,80
	605.148	5.313.528	11,13	21,65	16,15
	605.100	5.313.500	9,59	23,90	17,33
	605.139	5.313.962	8,00	25,80	21,60
	605.000	5.312.752	11,80	21,10	19,25
	604.993	5.312.725	10,95	21,50	19,65
	604.976	5.312.697	10,50	21,30	17,40
	604.973	5.312.665	11,90	22,00	20,30
	604.931	5.312.669	10,00	22,97	20,43
	604.913	5.312.654	10,50	21,90	18,80
	604.962	5.312.568	12,30	22,40	18,80
Pupetra	610.616	5.310.690	10,00	20,20	15,40
	610.615	5.310.688	9,20	18,60	16,10
	610.505	5.310.542	8,90	17,00	17,10
	610.529	5.310.554	10,40	17,69	15,60
	610.568	5.310.592	9,07	19,47	15,53
	610.600	5.310.635	10,60	17,40	14,80
	610.613	5.310.647	10,10	18,00	14,80

Elaboración propia.

Aunque no se consideró en esta oportunidad el uso de la temperatura superficial (TS) para la modelación de la humedad superficial de las turberas cubiertas con musgo *Sphagnum*, se puede apreciar que en ambas turberas caracterizadas las variables registradas presentan un comportamiento espacial diferenciado, sin evidenciar un comportamiento correlacionado, por lo que la inclusión de la TS se debe considerar en futuras actualizaciones del modelo de humedad que se ha generado.

En el Cuadro 4 se pueden apreciar los estadísticos que describen el comportamiento general de las variables registradas en ambas turberas. A nivel general, su puede establecer que ambos sistemas son diferentes en las tres variables, aunque las diferencias locales y el tipo de extracción del musgo, son dos aspectos que resaltan por sobre las comparaciones globales.

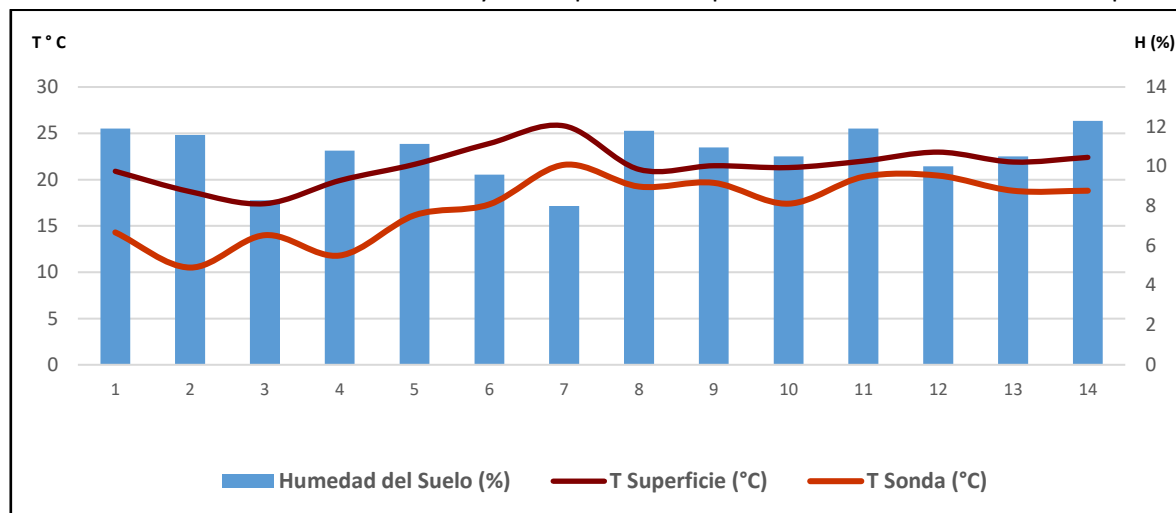
Cuadro 4. Estadísticos descriptivos de las variables registradas en terreno para ambas turberas.

Turbera	Promedio Humedad del Suelo (%)	Promedio T° Superficie (°C)	Promedio T° Sonda (°C)
Mocopulli	10,66	21,53	17,17
Pupetra	9,75	18,34	15,62

Elaboración propia.

La relación entre las variables registradas en ambas turberas se puede apreciar en las Gráficos 1 y 2, en los que se exponen los resultados locales obtenidos para la humedad y la temperatura superficial. En la turbera cercana a Mocopulli se evidencia que en la zonas con mayor intervención (puntos 1 – 7), tanto la presencia de agua en la superficie como la amplitud térmica en la capa de los primeros 15 centímetros es irregular espacialmente. En contraste, en las zonas con menor grado de intervención (puntos 8 – 14), caracterizados por un nivel de humedad más estable o equilibrado, la amplitud entre la temperatura superficial del suelo se mantiene más regular.

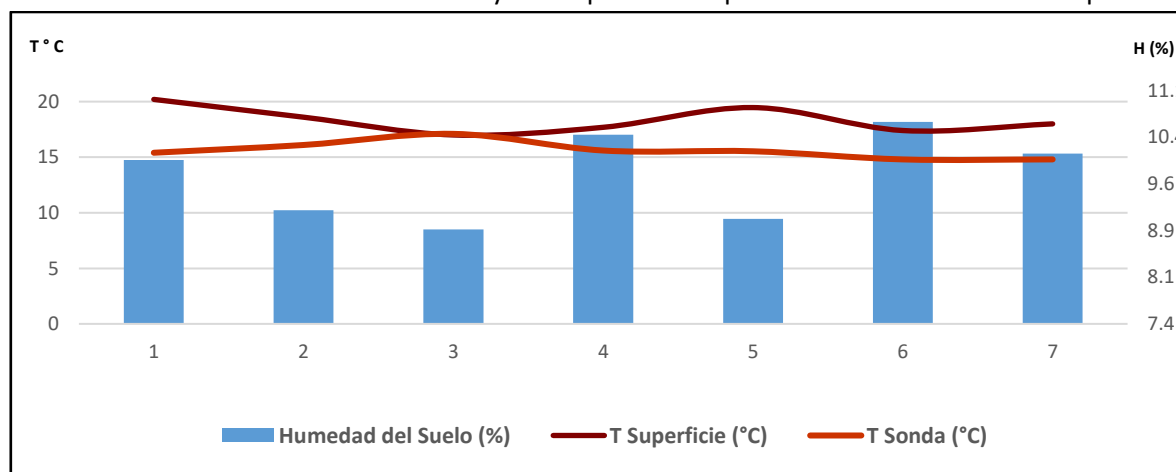
Gráfico 1. Relación entre la humedad y la temperatura superficial. Turbera cercana a Mocopulli.



Elaboración propia.

La diferencia en el tipo y forma de extracción del musgo se manifiesta en el comportamiento de la amplitud térmica del suelo en la turbera cercana a Pupetra. En ella se encontró una diversidad de vegetación mayor, además de signos de una forma de extracción del musgo semejante a un raleo superficial de los pompones, lo que se traduce en la disminución de la capa de musgo y del contenido de agua retenido en su interior que actúa como amortiguador térmico.

Gráfico 2. Relación entre la humedad y la temperatura superficial. Turbera cercana a Pupetra.



Elaboración propia.

A cada punto levantado en terreno se le atribuyó la información obtenida de la reflectancia y los índices espectrales (NDVI y NDWI), generados a partir del procesamiento de la información satelital (Landsat 8). En el Cuadro 5 se observa el resumen de las variables que se asignaron a cada punto de muestreo, en el que incluyen los valores de la reflectancia (bandas 2 a la 7 del sensor OLI)

Cuadro 5. Resultados obtenidos para la reflectividad y los índices espectrales considerados en la determinación de la humedad superficial en las turberas seleccionadas.

Turbera	H°_suelo	Ref_b2	Ref_b3	Ref_b4	Ref_b5	Ref_b6	Ref_b7	NDVI	NDWI
Mocopulli	11,90	0,17	0,15	0,16	0,49	0,25	0,14	0,52	-0,53
	11,58	0,16	0,14	0,13	0,46	0,25	0,13	0,56	-0,54
	8,30	0,16	0,14	0,15	0,45	0,29	0,16	0,51	-0,52
	10,80	0,18	0,17	0,18	0,48	0,33	0,19	0,45	-0,48
	11,13	0,16	0,14	0,12	0,45	0,25	0,13	0,57	-0,53
	9,59	0,16	0,15	0,14	0,49	0,28	0,14	0,56	-0,54
	8,00	0,16	0,14	0,12	0,40	0,30	0,16	0,53	-0,48
	11,80	0,16	0,15	0,15	0,54	0,18	0,09	0,56	-0,57
	10,95	0,16	0,14	0,14	0,51	0,21	0,12	0,56	-0,56
	10,50	0,16	0,15	0,15	0,55	0,20	0,11	0,56	-0,58
	11,90	0,18	0,18	0,19	0,59	0,25	0,14	0,52	-0,53
	10,00	0,20	0,20	0,22	0,52	0,35	0,22	0,40	-0,45
	10,50	0,19	0,17	0,19	0,48	0,32	0,18	0,43	-0,48
	12,30	0,18	0,16	0,18	0,48	0,31	0,17	0,46	-0,50
Pupetra	10,00	0,16	0,14	0,13	0,42	0,14	0,08	0,53	-0,49
	9,20	0,16	0,14	0,13	0,42	0,14	0,08	0,53	-0,49
	8,90	0,17	0,14	0,13	0,37	0,24	0,14	0,48	-0,45
	10,40	0,17	0,14	0,13	0,37	0,24	0,14	0,48	-0,45
	9,07	0,17	0,14	0,15	0,45	0,18	0,10	0,51	-0,52
	10,60	0,17	0,14	0,15	0,47	0,15	0,08	0,51	-0,53
	10,10	0,17	0,15	0,15	0,46	0,15	0,09	0,52	-0,51

Elaboración propia. Fecha imagen satelital: 30 de diciembre de 2016. Hora local: 11:36 PM.

Usando como base la información del Cuadro 5, se procedió a realizar un análisis de la correlación existente entre la humedad y las variables generadas para cada localización. En el Cuadro 6 se aprecian los resultados obtenidos, destacando que la reflectividad de la banda 3 explica casi íntegramente a la reflectividad de las bandas 2 y 4, al igual que la banda 6 con la banda 7.

Cuadro 6. Correlaciones obtenidas para la humedad, la reflectividad y los índices espectrales.

	H°_suelo	Ref_b2	Ref_b3	Ref_b4	Ref_b5	Ref_b6	Ref_b7	NDVI	NDWI
H°_suelo	1,00								
Ref_b2	0,17	1,00							
Ref_b3	0,32	0,94	1,00						
Ref_b4	0,35	0,94	0,96	1,00					
Ref_b5	0,59	0,35	0,57	0,61	1,00				
Ref_b6	0,03	0,60	0,54	0,53	0,09	1,00			
Ref_b7	0,03	0,72	0,65	0,61	0,09	0,98	1,00		
NDVI	0,08	-0,86	-0,67	-0,70	0,13	-0,56	-0,68	1,00	
NDWI	-0,39	0,44	0,23	0,14	-0,66	0,37	0,48	-0,76	1,00

Elaboración propia.

Incorporando los resultados del análisis de correlación entre los datos de humedad superficial y la información espectral en un análisis de regresión múltiple, se obtuvieron diversas combinaciones de variables que generaron sus respectivos modelos. En el Cuadro 7 se presentan algunos de los resultados obtenidos para las variables seleccionadas como representantes del conjunto de bandas e índices espectrales iniciales. Además, se detallan los coeficientes de correlación múltiple y de determinación (R^2). El primero de los coeficientes sirve como una medida de la relación lineal entre la humedad y el conjunto de variables considerado en cada modelo, mientras que el segundo es capaz de determinar la calidad del modelo y la proporción de variación de los resultados que explica.

Cuadro 7. Modelos, variables y estadísticos obtenidos para la humedad superficial de turberas de musgo *Sphagnum*.

Modelo	Variables	Coeficiente de correlación múltiple	Coeficiente R^2
1	Intercepción, B3, B5 y B7	0,61	0,37
2	Intercepción, B3, B5, B6 y B7	0,61	0,37
3	Intercepción, B3, B5, B7, NDWI	0,67	0,44
4	Intercepción, B3, B5, B7, NDWI, NDVI	0,68	0,47

Elaboración propia.

La mejor relación lineal y proporción de variabilidad de los resultados explicados se encontró con el modelo 4, el que considera las reflectividades espectrales corregidas topográficamente de las bandas 3, 5 y 7 del sensor OLI (Landsat 8), junto a los índices espectrales NDVI (presencia de vegetación) y NDWI (presencia de agua).

De esta forma, se estableció la siguiente expresión o algoritmo para la humedad superficial de las turberas caracterizadas en el presente estudio:

$$\text{Humedad} = -64,02 + 441,05 * B_3 - 125,57 * B_5 - 61,03 * B_7 - 10,29 * NDVI - 158,47 * NDWI \quad (1)$$

Utilizando la expresión (1) se obtuvo una cobertura continua (raster) con la humedad superficial de las turberas, espacializada mediante la integración de la información proveniente de Landsat 8 y la levantada en terreno, con una resolución espacial de 30 metros. En el Cuadro 8 se presentan los parámetros globales obtenidos en cada turbera considerada, además del número de celdas que se han podido contemplar en su caracterización.

Cuadro 8. Resumen de parámetros obtenidos de la modelación y espacialización de los registros obtenidos en terreno, en base a la imagerie satelital de Landsat 8 (OLI).

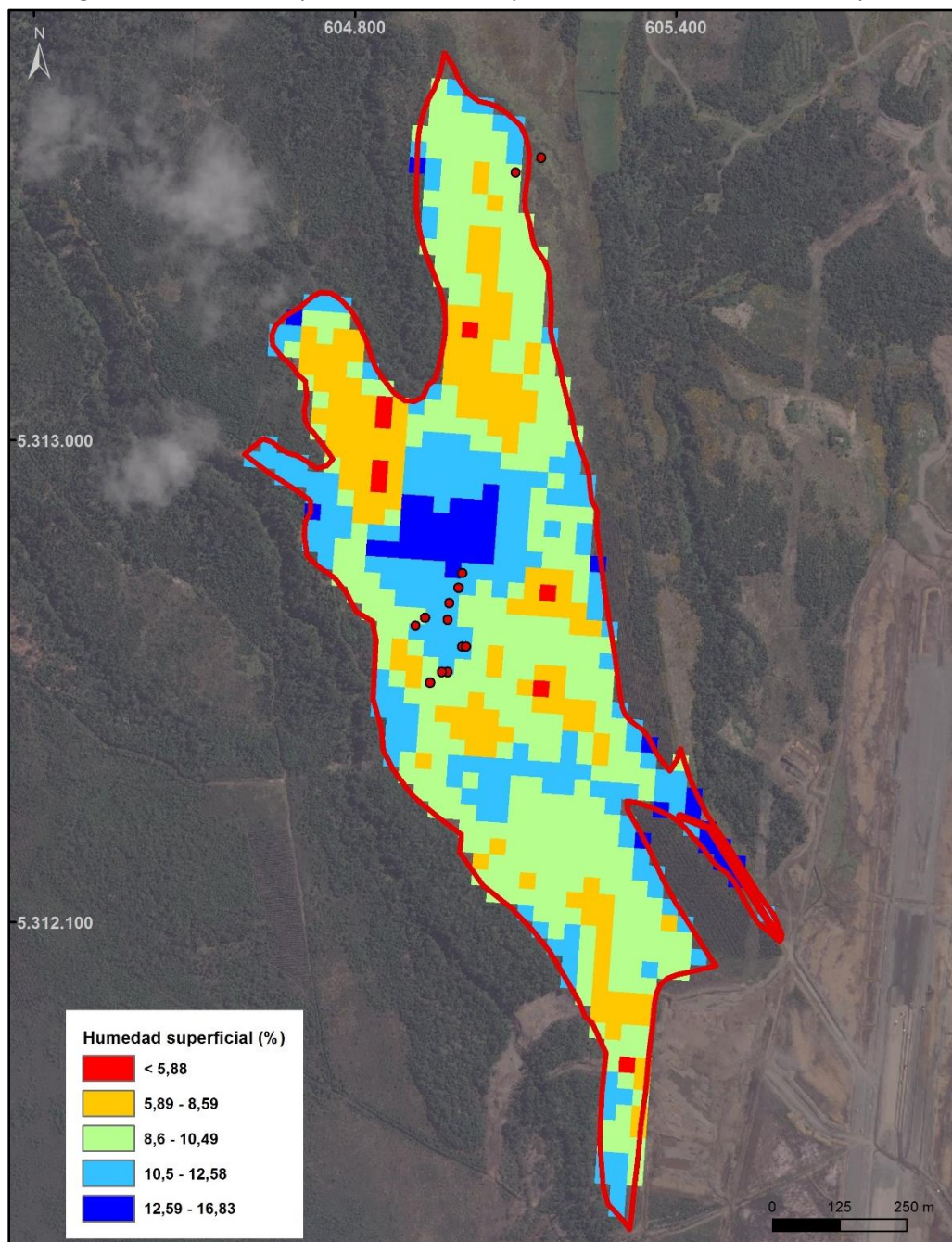
Sector Turbera	Humedad máxima (%)	Humedad mínima (%)	Valor promedio (%)	Desviación estándar (%)	Número de celdas
Mocopulli	16,83	2,76	9,91	2,14	890
Pupetra	16,67	4,99	11,83	2,45	129

Elaboración propia.

El mapeo de la expresión (1) se puede apreciar en la Figura 6 (Mocopulli) y en la Figura 7 (Pupetra). En el caso de la turbera cercana a Mocopulli, los sectores con mayor concentración de humedad

coinciden con los sectores que presentaban un alto grado de intervención, concentrándose en aquellos sectores donde se encuentran los canales de drenaje y secado, mientras que los sectores con menor humedad superficial corresponden a aquellos con menor intervención y mayor presencia del musgo *Sphagnum*, el que actúa como una capa esponjosa que retiene el agua bajo los 15 centímetros.

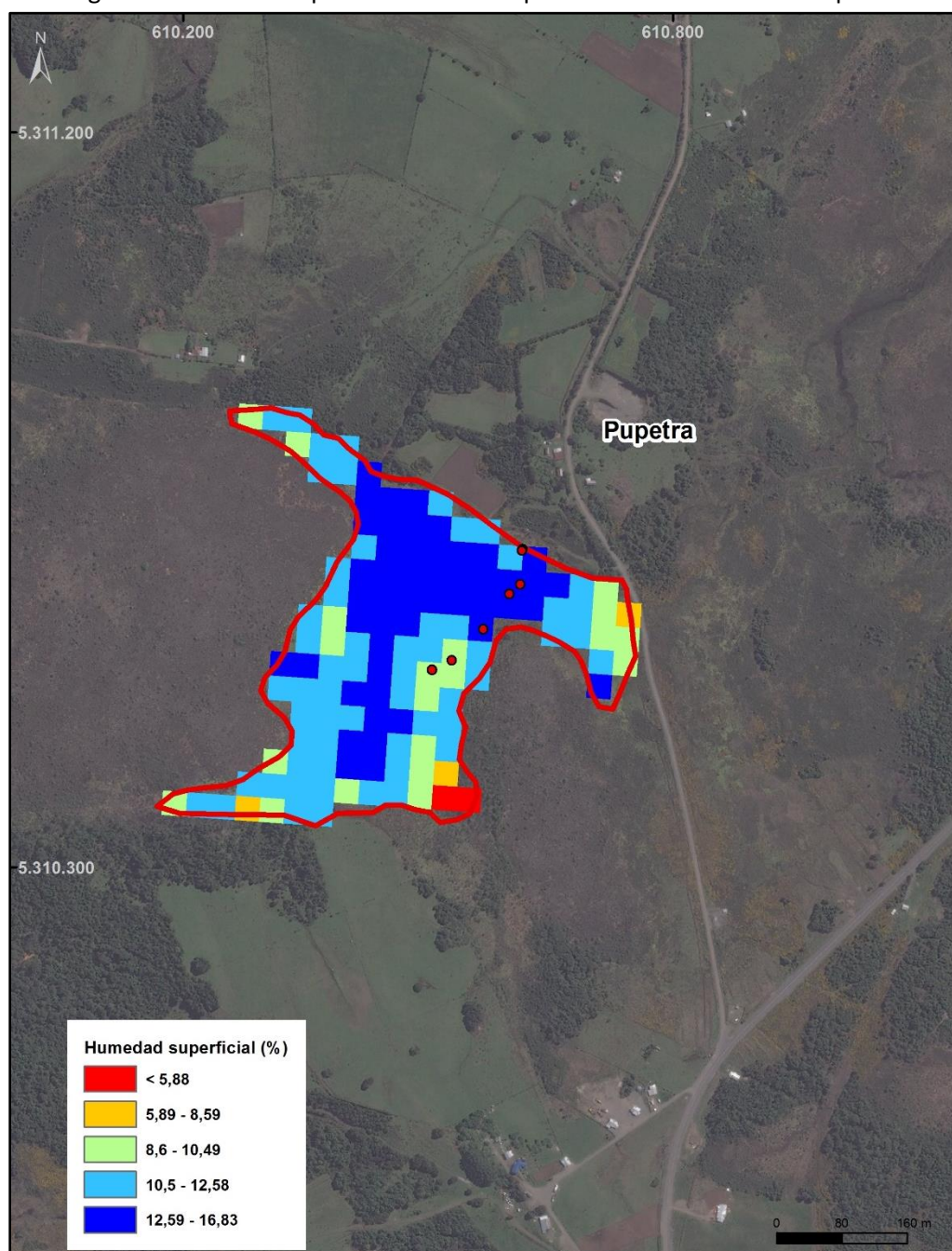
Figura 6. Humedad superficial modelada para la turbera cercana a Mocopulli.



Elaboración propia. Sist. Coord.: WGS 1984, UTM, H 18 S.

En el caso de la turbera cercana a la localidad de Pupetra (Figura 7), se puede apreciar que el comportamiento superficial de la humedad es diferente al caso de Mocopulli, caracterizado por una gran extensión del pomponal. El raleo continuo del pompón maduro ha provocado que la turbera presente un alto grado de humedad superficial en aquellos sectores cercanos a las vías de extracción. En un sector central se registraron valores más cercanos a los del caso de Mocopulli, no obstante, correspondían a sectores de acopio del material o pequeños montículos en formación.

Figura 7. Humedad superficial modelada para la turbera cercana a Pupetra.



Elaboración propia. Sist. Coord.: WGS 1984, UTM, H 18 S.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente estudio del ambiente de turberas de Chiloé, caracterizado por la presencia y el dominio superficial del musgo *Sphagnum*, ha sido el primer apronte en la obtención de una serie de algoritmos y herramientas automatizadas que permitan el monitoreo ambiental a escala local y nacional, de manera eficiente y flexible, pero manteniendo la certeza estadística y espacial brindada por el método científico. Como primer caso de estudio en la creación y calibración de algoritmos basados en métodos y técnicas de Percepción Remota, se ha seleccionado a la humedad de la superficie de las turberas cercanas a las localidades de Mocopulli y Pupetra.

En ambas turberas se ha diseñado, implementado y validado la metodología de trabajo basada en el levantamiento de información en terreno sobre variables de interés y su integración en un SIG con la imagería satelital disponible en forma gratuita a la comunidad. Se obtuvieron registros de las variables seleccionadas coincidentes con el momento de pasada del satélite (Landsat 8), así como también se construyeron índices espectrales que fueron incluidos en la modelación. A pesar de los condicionamientos propios de este tipo de ambientes, se logró obtener registros con representatividad geoestadística, lo que permitió modelizar y espacializar la humedad superficial de las turberas cubiertas con el mismo tipo de musgo, en diferentes estados de conservación.

El algoritmo generado es utilizable en turberas del mismo tipo que el caracterizado en la isla de Chiloé, en las que la presencia de vegetación vascular es baja y poco densa. Se deben considerar aspectos de tamaño mínimo y representatividad geoestadística para futuros análisis comparativos, dadas las condicionantes del sensor satelital utilizado como referencia, además de la ventana temporal que limita el número de registros que puede levantar un equipo, entre otras limitantes operativas. El uso del algoritmo en otros sistemas de turberas siempre debe ser referencial y tomado para realizar contrastes entre sus coeficientes, las bandas o índices espectrales considerados en la modelación o la forma funcional del propio algoritmo (modelos no lineales, redes neuronales, etc.).

El desarrollo del presente estudio permitió determinar que la espacialización de la humedad superficial de las turberas, usando métodos de Percepción Remota, permite el monitoreo y fiscalización de las actividades legales e ilegales de extracción de turba. Los sectores con mayor grado de intervención resaltan en los resultados modelados, a través del agrupamiento de píxeles pertenecientes a la categoría de alta humedad (>12,59 %). Además, se analizaron las diferentes reflectividades e índices espectrales relevantes en la temática, obteniendo cinco variables explicativas que abarcan más del 47 % de la variación observada.

Se recomienda que el algoritmo sea complementado con otras variables físicas o índices espectrales, con el fin de aumentar la confianza estadística del modelo generado. Esto se podría lograr incluyendo variables como la temperatura superficial y otros índices vegetacionales (SAVI, EVI, ARVI, entre otros). También se debe enriquecer la variabilidad temporal del modelo, llevando a cabo nuevas campañas de terreno e incluyendo otras estaciones del año en su calibración y ajuste.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Díaz, M., Larraín, J., Zegers, G., & Tapia, C. (2008). Caracterización florística e hidrológica de turberas de la Isla Grande de Chiloé, Chile. *Revista chilena de historia natural*, 81(4), 455-468. <https://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2008000400002>
- Hauser, A. (1996). Los depósitos de turba en Chile y sus perspectivas de utilización. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 23, No. 2, p. 217-229.
- Zegers, G. Larraín, J. Díaz. F. & JJ. Armesto. (2006). Impacto ecológico y social de la explotación de pomponales y turberas de *Sphagnum* en la Isla Grande de Chiloé. *Revista Ambiente y Desarrollo (Chile)* 22: 28-34.

7. ANEXOS

FICHA DE TERRENO TURBERAS											
Nombre Observador									Fecha		
ID WP	Hora	Topónimo	Centroide Parcela		Altitud	H° suelo	Ph Suelo	T (° C) suelo	T (° C) Superficie	% cubierto con vegetación	OBS.
			x	y							

Elaboración Propia.