



**FACULTAD DE
CIENCIAS**
UDELAR | fcien.edu.uy



CENUR
Litoral Norte
Paysandú



**UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY**

**Tesina para optar por el grado de Licenciatura en
Ciencias Biológicas.**

Facultad de Ciencias, Universidad de la República.

EVALUACIÓN DE LAS COBERTURAS DE SUELO Y CALIDAD DEL AGUA DE LAS SUBCUENCAS DEL RÍO QUEGUAY.



Esteban Maximiliano Ibarguren Rüting

**Tutora: Dra. Christine Lucas, Polo Ecología Fluvial, Departamento del Agua,
CENUR Litoral Norte, Sede Paysandú, UdelAR.**

**Paysandú, Uruguay
2020**

Agradecimientos

A mis padres y abuelos por su incondicional apoyo desde el interior del país en el descubrimiento de mi camino y la posibilidad de acceder a la universidad.

A mi tutora Christine, por abrirme las puertas del Polo de Ecología Fluvial, por su confianza y conocimiento transmitido, que sin ella tampoco habría podido finalizar mi carrera.

A todo el equipo presente en CENUR Litoral Norte - Sede Paysandú y la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni - EEMAC.

Al Tec. Recursos Naturales Elias Brum, Guardaparque, Montes del Queguay, SNAP, quien acompañó todo el monitoreo de calidad de agua desde su inicio. Se agradece su experiencia en la identificación de coberturas de suelo en las actividades de “ground-truthing” en el área de estudio.

A la Oficina Regional Litoral del Sistema Nacional de Áreas Protegidas - SNAP, inclusive el Director Regional Ing. Agr. Francisco Bergós, por su apoyo logístico de los trabajos de monitoreo en el área y las zonas adyacentes.

A la Sección Limnología, Facultad de Ciencias - particularmente al Dr. Guillermo Chalar por colaborar en el proyecto con el análisis de nutrientes.

Al Club Queguay Canoas por su apoyo logístico en el monitoreo de agua.

Y a MSc. Mercedes Paradiso de la Unidad Gestión Ambiental y el Depto. De Higiene de la Intendencia Departamental de Paysandú, por su apoyo con datos de calidad de agua del mismo.

A la comisión evaluadora, Dr. Santiago Baeza y Dr. Guillermo Chalar por su tiempo y los comentarios para mejorar la tesis.

Resumen

La contaminación de los sistemas acuáticos se ha convertido en un desafío a nivel global, comprometiendo tanto la salud física de la población humana como su entorno ambiental. Uruguay tampoco es la excepción en esta situación, ya que durante décadas ha ido desarrollando y diversificando su economía acompañado por cambios en la calidad de las aguas, los cuales se han asociado con la industria agrícola-ganadera (en el interior del país) y efluentes de actividades industriales y urbanas. La reserva natural “Montes del Queguay”, incluye una de las zonas más amplias de bosque nativo en el Uruguay; lo cual juega un papel importante en el mantenimiento de la calidad y regulación de la hidrología en la cuenca del Río Queguay Grande. El objetivo de este trabajo fue generar una capa actualizada de la cobertura de suelos en seis subcuencas hidrográficas de la zona Queguay y analizar su vínculo con un conjunto de parámetros fisicoquímicos del agua, además de evaluar su estado actual. Dicho cometido, se realizó a partir de imágenes satelitales Sentinel y muestreos de agua pertenecientes a los años 2018 y 2019. Se presentó como resultado una serie de mapas con coberturas de suelo en dicho periodo y los porcentajes de área relativa de estas coberturas. Estos mapas se desarrollaron a partir de clasificación supervisada y en base de un falso color con aplicaciones en el reconocimiento de coberturas agrícolas, integrando las bandas azul (2), infrarrojo cercano (8) e infrarrojo de onda corta (11). Se encontraron relaciones significativas con respecto a mayor concentración de fósforo total (PT) con mayor área de cultivo en la subcuenca; mayores concentraciones de nitrato (NO₃) con mayor área de pastizal natural/seminatural y también menores concentraciones este último nutriente con mayor cobertura de plantaciones forestales. Los resultados podrían sugerir que las actividades agrícolas ubicadas en las subcuencas circundantes podrían contribuir a los niveles de PT de los recursos hídricos de la zona, los cuales sobrepasan los niveles permitidos a escala nacional para aguas destinadas al riego y recreación. Sin embargo, debido a condiciones climáticas (presumiblemente de sequía) y ciclos de cosecha, la clasificación tuvo errores sobre las coberturas de pastizal natural/seminatural y suelo

desnudo, por lo que se deben relativizar las conclusiones. Este trabajo muestra la importancia de entender el vínculo entre actividades en las cuencas y la calidad de agua de los cursos fluviales, particularmente los cuales son objetos de la conservación y la gestión sostenible de recursos acuáticos.

Palabras claves: *calidad de agua; cobertura de suelo; eutrofización; teledetección.*

Tabla de contenido

1 Introducción

1.1 Panorama mundial y recursos hídricos _____	5
1.2 Rol de la teledetección _____	7
1.3 Calidad de agua en Uruguay y amenazas _____	9
1.4 Reserva Queguay y su importancia _____	11
1.5 Hipotesis _____	12
1.6 Objetivo general _____	12
1.7 Objetivos específicos _____	12

2 Metodología

2.1 Sitio de estudio _____	13
2.2 Diseño del muestreo _____	15
2.3 Adquisición de las imágenes del terreno _____	17
2.4 Determinación de las imágenes _____	18
2.5 Verificación en campo _____	21
2.6 Clasificación de las imágenes _____	22
2.7 Datos climáticos _____	25
2.8 Análisis estadístico _____	27

3 Resultados

3.1 Clasificación supervisada de las coberturas de suelo en las subcuencas del Río Queguay _____	29
3.2 Evaluación de las diferencias entre sub-cuencas en temperatura, oxígeno, turbidez y concentración de nutrientes _____	33
3.3 Evaluación de la relación entre parámetros fisicoquímicos del agua y cobertura de suelo en la cuenca hidrográfica _____	37

4 Discusión

4.1 Clasificación de la cobertura del suelo _____	41
4.2 Calidad de agua _____	43

4.3 Relación entre cobertura de suelo y nutrientes en el agua	45
4.4 Conclusiones	47
5 Bibliografía	48

Introducción

1.1 Panorama mundial y recursos hídricos

La contaminación acuática se ha convertido en un desafío global tanto para países desarrollados como en vías de desarrollo. Por un lado, ha causado un deterioro en la calidad del agua y cambios en los ciclos biogeoquímicos y de la biodiversidad; por otro lado, ha afectado el crecimiento económico, la salud física y ambiental para la población humana, e incluso en algunos casos, con alteraciones irreversibles en los distintos cuerpos de agua (**Sagasta et al., 2017 ; Galizia & Matsumura, 2011**).

El suministro de recursos hídricos es finito en el planeta y este no puede aumentar constantemente en función de la demanda de la población humana con un crecimiento demográfico exponencial (**Wetzel, 2001**).

Con las tendencias actuales, se espera que para el año 2025, el 64% de la población mundial padezca condiciones de carencia en el acceso al agua potable (**Steinfeld et al., 2006**). Según la Agenda 2030 para el Desarrollo Sustentable, que incluye temas sobre la administración de los recursos naturales, consumo y producción, adecuada gobernanza y sociedades pacíficas, reconoce a la calidad del agua entre sus metas principales, con el objetivo de influenciar futuras medidas políticas respecto al agua y asegurar este tema dentro de las prioridades de todas las naciones (**United Nations, 2016**).

En particular, el sector de la agricultura se encuentra en el primer puesto mundial como fuente de contaminación del agua, abarcando un 70% del total de contaminantes, combinando agroquímicos, materia orgánica, residuos farmacéuticos, sedimentos, drenaje salino y pesticidas, y fertilizantes (principalmente nitrógeno y fósforo) (**Sagasta et al., 2017**). Estos últimos, cuyo uso data desde el siglo XIX, han sido usados como suplemento de los nutrientes naturales, pero la aplicación moderna global es tan excesiva que **Rockström et al., 2009** sugiere que ya podríamos haber superado un umbral que desencadenaría cambios ambientales en todo el planeta.

Sumado al ámbito productivo anterior, también se encuentra el sector ganadero, posicionado en el puesto número tres entre los mayores causantes de los conflictos ambientales (incluida la degradación de la calidad del agua) el cual abarca el 70% de toda la tierra cultivable y 30% de toda la superficie de la Tierra **(FAO, 2006)**. La economía del ganado consume un 8% del agua humana a nivel mundial, principalmente para el riego de cultivos forrajeros. Además, surgen problemas con la reposición del agua en el suelo debido a la compactación del suelo y reducción en la capacidad de infiltración con la consecuente degradación de los cursos de agua, alteración del suelo y napas freáticas; genera descargas de heces, hormonas, antibióticos y químicos usados en las curtiembres y sedimentos originados por las pasturas erosionadas **(Steinfeld et al., 2006)**.

Las fuentes o actividades que amenazan los recursos acuáticos en Uruguay son muy variadas, entre ellas, se reconocen a: la deforestación (que altera los patrones de drenaje, disminuye la recarga natural de los acuíferos y aumenta la sedimentación); la construcción de presas/reservorios/diques/canales (que afectan el caudal de los ríos, transporte de nutrientes y sedimentos, interfieren con la migración y la reproducción de las especies, destruyen conexiones con ríos y hábitats por inundaciones); la introducción de especies exóticas (que disminuye las especies nativas, modifica los ciclos de nutrientes y biológicos) **(Galizia & Matsumura, 2011)**; el aumento de zonas urbanas e industriales (que descargan aguas residuales con nutrientes, materia orgánica, desechos y diversas toxinas) **(Paul & Meyer, 2001)**; la acidificación de las aguas dulces producto de regiones con altos niveles de óxidos de azufre y compuestos nitrogenados en la atmósfera, lo que produce lluvia y nieve ácida **(Allan & Castillo, 2007)**; antiguas explotaciones mineras que actúan como fuentes puntuales de contaminación por lixiviación de metales pesados, **(Clements et al., 2000)** entre muchos otros.

1.2 El rol de la teledetección

La utilización de la teledetección y los softwares o sistemas de información geográfica (entre otras tecnologías), se han desarrollado considerablemente en las últimas décadas, y en el presente, estas se encuentran en la vanguardia para monitorear los cambios en las actividades antropogénicas ocasionadas sobre los ecosistemas.

El término teledetección cobró relevancia luego de 1962 y este puede referirse a la “observación no invasiva de la Tierra usando ondas electromagnéticas desde una plataforma a cierta distancia del objeto de estudio” (**Guo et al., 2020**). Actualmente, se disponen de diferentes sensores ópticos para obtener grandes conjuntos de datos con alta precisión y resolución, con frecuencias en la adquisición de datos que van desde una vez por mes a una vez por minuto, resolución espacial con escalas de kilómetros a centímetros, y un amplio espectro electromagnético de detección (**Guo et al., 2020**).

La utilización de la teledetección con respecto al monitoreo de cambios globales se ha enfocado principalmente a la observación y comprensión del clima de la Tierra, pero los adelantos tecnológicos y científicos han hecho posible el estudio sobre otras disciplinas, como el avance de nuestra comprensión general sobre los sistemas biológicos (**Turner et al., 2003; Horning et al., 2010; Pettorelli et al., 2014**).

Años de empleo, han demostrado la utilidad de esta tecnología para proporcionar datos a los administradores de zonas protegidas, sobre los cambios en la superficie y degradación de los hábitats, alteraciones en la diversidad y distribución de las especies, tendencias de presiones y amenazas (**Nagendra et al., 2012**).

Por ejemplo, los satélites junto con los software especializados en procesar su información, han cambiado radicalmente la manera en que se cartografían las pautas de distribución de los bosques, su estado general, las tasas de deforestación y los servicios ambientales que éstos prestan; incluida la evaluación de la composición de los bosques, el grado de cobertura del dosel, la densidad de los árboles, etc. (**Newton, 2007**). Claramente, estos datos pueden utilizarse para informar sobre cambios en el paisaje que pueden llegar a poseer un impacto adverso sobre la biodiversidad y asistir en proyectos de restauración ecológica a largo plazo (**Jones et al., 2009**).

Las aplicaciones de esta tecnología son muy variadas y su empleo en conservación de bosques es solo uno de múltiples ejemplos **(Souza et al., 2013)**. Además la teledetección abarca proyectos relacionados a la medición de parámetros cualitativos de los cuerpos de agua, como sedimentos en suspensión, materia orgánica disuelta, clorofila-*a* y contaminantes, con el objetivo de vigilar las aguas con mayor eficacia y toma de decisiones **(Gholizadeh et al., 2016)**; seguimiento de calidad del aire mediante análisis y previsiones de acontecimientos, inferencia de la propia calidad de superficie y estimaciones de las emisiones **(Martin, 2008)**; mapeo y monitoreo de desastres naturales recurrentes (muchas de ellas debido al cambio climático) tales como incendios forestales, inundaciones urbanas y rurales, deslizamientos de tierra, tsunamis, erosión del suelo, aparición de actividad volcánica y olas de calor **(Poursanidis & Chrysoulakis, 2017)**.

De esta manera, los datos espaciales obtenidos mediante el sensorio remoto pueden utilizarse para identificar acontecimientos o procesos que puedan estar ocurriendo en este momento y emprender medidas de restauración y prevención antes de que sea demasiado tarde o costoso; en otras palabras, la teledetección desempeña un papel vital en la caracterización y cartografía de los hábitats **(Nagendra et al., 2012)**.

Con el transcurso del tiempo, se prevé que los datos satelitales aumenten en disponibilidad a medida que se lancen nuevos sensores, y se continúen desarrollando los algoritmos necesarios para procesar la información eficazmente; también se dispondrán de más técnicas e insumos de código abierto que beneficiarán a los países con financiación más limitada en el monitoreo de sus ecosistemas **(Nagendra et al., 2012)**. Esto significa para la humanidad, un exorbitante aumento en la cantidad de datos espacio-temporales enfocados a una mayor comprensión de nuestro entorno vital **(Guo et al., 2020)**.

1.3 Calidad de agua en Uruguay y amenazas

Nuestro país posee una extensa red hidrográfica con una considerable variabilidad temporal y espacial en sus caudales **(Conde & Sommaruga, 1999)**. Con el transcurso de las décadas, Uruguay ha ido desarrollando y diversificando su economía, pero en detrimento de la calidad de los sistemas acuáticos, asociado mayoritariamente a las actividades agropecuarias, efluentes de actividades industriales y urbanas; además, a esto se le suma la imprevisibilidad que afrontamos ante el inevitable cambio climático **(Sistema Nacional ambiental, 2018)**.

La explotación de los recursos naturales muchas veces han sido realizados con controles insuficientes con respecto a la preservación del ambiente, generando consecuencias contraproducentes en la calidad del agua y por ende, en los ecosistemas acuáticos del país **(Bonilla, et al., 2015; Brazeiro, 2015)**. Entre dichas problemáticas, se mencionan: el auge de la eutrofización de nuestros sistemas acuáticos desde hace décadas, asociado a los usos de suelo, cambios hidrológicos impuestos por el hombre y surgimiento de cianobacterias tóxicas **(Quirós & Luchini, 1982; Conde & Sommaruga, 1999; Conde et al., 2002; Aubriot et al., 2005)** (localizado mayoritariamente sobre los Río Uruguay, Río Negro y las costas del Río de la Plata) **(Bonilla, et al., 2015)**; a esto se le suma una acentuada sustitución de los ecosistemas uruguayos naturales con agricultura, forestación y minería **(Brazeiro, 2015)**.

En principio, la ganadería no implicaría tal sustitución ecosistémica y por ello no se la incluye, pero es importante enfatizar que la intensificación de esta actividad acorde a como se prevé con 11 millones de hectáreas para los próximos años, significaría para el campo natural del país, un cambio en la biodiversidad, erosión de suelos y fuentes puntuales de contaminación del agua **(Brazeiro, 2015)**. Por otro lado, para el sector agrícola, se calcula que para el año 2030 las áreas con rotación de cultivo de invierno-verano (mayoritariamente trigo-soja) ocupen 2 millones de hectáreas; esto conlleva la estimación de 7 toneladas de herbicida más 0,4 toneladas de insecticida cada 1000 hectáreas **(Brazeiro, 2015)**, además, ello conlleva erosión de suelos

relacionados (**García Prechac et al., 2010**). Por último, se tiene el incremento de la superficie forestal con una proyección de 1 millón de hectáreas para el año 2030 (**Brazeiro, 2015**). Tal escenario plantea dos impactos importantes: modificación del ciclo hidrológico con bajo escurrimiento superficial y acidificación de los suelos donde se establezca la forestación (**Céspedes-Payret et al., 2009**).

Como consecuencia, el deterioro se aplica principalmente a las aguas superficiales, y en menor medida (en gran parte desconocido y poco estudiado) a las aguas subterráneas (**Sistema Nacional ambiental, 2018**).

Como paso esencial en la tarea de proteger la integridad ecológica y conservar el régimen hidrológico dentro de su estado natural, es necesario perfeccionar e innovar el monitoreo a corto y mediano plazo en aspectos hidrológicos, ecosistémicos, calidad y usos del agua, sin descuidar tampoco la variabilidad climática que se acentuará en las próximas décadas (**Sistema Nacional ambiental, 2018**).

Es pertinente mencionar que cuando se habla de “calidad de agua”, esta hace referencia a la aptitud del agua para los usos beneficiosos del hombre y de los animales, soporte de una vida sana, riego de cultivos y recreación; pero desde la perspectiva ecológica, “calidad” posee un significado ligeramente distinto, ya que en ciertos ecosistemas, diversas variables fisicoquímicas con valores fuera de lo habitual, también son capaces de ser hábitats para determinadas comunidades de organismos (**Roldán & Ramírez, 2008**).

Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) las fuentes de polución puede categorizarse en puntual y difusa; para el primer caso, los efluentes vierten directamente y el foco de contaminación es evidente, por otro lado, para el tipo difuso o no localizado, es ocasionada por un grupo de actividades humanas sin un foco exacto de contaminación (**Gallego & Pradana, 2019**).

Los efectos de la contaminación, indudablemente poseen el potencial de socavar los servicios ecosistémicos, es decir, “las condiciones y procesos a través de los cuales los ecosistemas y las especies que los componen sustentan y satisfacen la vida humana” (**Daily, 1997**). La radical importancia de dichos servicios yacen en brindarnos:

aprovisionamiento de agua, biodiversidad, mantenimiento del ciclo hidrológico, regulación del clima, amortiguación de crecidas, prevención de erosión y recarga de aguas subterráneas, regulación de la calidad de agua, valor paisajístico, antropológico y sitio de recreación **(MVOTMA, 2007)**. Por ello, en aras de gestionar y conservar los recursos naturales es necesario su seguimiento y análisis para realizar predicciones sobre el futuro de los sistemas **(Aubriot et al., 2017)**.

1.4 Reserva del Queguay y su importancia

El área protegida con recursos naturales llamada Montes del Queguay, incluye una de las zonas más amplias de bosque nativo en el Uruguay. A nivel funcional, el área juega un papel en el mantenimiento de la calidad del agua y en la regulación del régimen hídrico en la porción baja de la cuenca del río Queguay (zona con actividades intensivas en el uso del suelo); con lo que la disrupción del lugar provocaría alteraciones en los sucesos de inundación en la zona de la desembocadura del Queguay en el río Uruguay **(Achkar et al., 2007)**. Desde la década del 80, el área ha estado habitada en sus alrededores por pequeños poblados con actividades de ganadería, agricultura, lechería y forestación, por lo que las transformaciones del suelo son un factor importante, principalmente debido a la implementación de monocultivos forestales y la historia de ganadería bovina extensiva **(Achkar et al., 2007)**. Entre las posibles consecuencias de las variadas actividades antrópicas sobre esta zona, se pueden citar cambios poblacionales de especies focales, cambios en la estructura y composición de los bosques, ingreso de productos químicos nocivos al ambiente, aumento de los niveles de nutrientes en el agua (por aplicación de agroquímicos), cambios en el caudal, alteración de los pulsos de inundación y pérdida de hábitat **(MVOTMA, 2012)**.

El monitoreo y regulación del lugar por ende resulta de suma importancia, no solo por el valor intrínseco latente en su heterogeneidad biológica y geográfica, sino por su importancia funcional en distintos niveles ecológicos para la zona y sus inmediaciones. Una explotación no regulada, así como la intromisión de construcciones humanas,

puede desencadenar diversos y perjudiciales cambios que conlleven consecuencias negativas para nuestro patrimonio natural, las zonas productivas con elevado potencial de explotación y los poblados cercanos. El siguiente trabajo, nace a partir del esfuerzo e iniciativa de quienes promueven el uso sustentable de la reserva del Queguay, la conservación, remediación y restauración del ecosistema.

1.5 Hipótesis

Las zonas terrestres en las subcuencas del Río Queguay, se caracterizan por campos con distintas actividades antrópicas que pueden dividirse principalmente en agrícolas, ganaderas y forestales. Cada una de estas coberturas de suelo tiene una firma espectral característica que permite una clasificación de coberturas en base a distintas combinaciones de bandas satelitales. Las actividades humanas mencionadas aportan nutrientes, sedimentos y otras sustancias que alteran los parámetros fisicoquímicos del agua. Por ende, se plantean como hipótesis: 1) que habrán diferencias entre sitios en temperatura, turbidez y OD; 2) la concentración de nutrientes de los distintos cursos fluviales cambiará en función al porcentaje de cobertura de cultivo, pastizal natural/seminatural y plantación forestal de las subcuencas.

1.6 Objetivo general

Clasificar la cobertura de suelo en seis subcuencas que desembocan hacia el Río Queguay y analizar diferencias en parámetros fisicoquímicos de calidad del agua en las mismas potencialmente asociadas con las actividades terrestres a escala de subcuenca.

1.7 Objetivos específicos

- 1) Generar una clasificación actualizada de la cobertura del suelo en seis subcuencas del Río Queguay mediante clasificación supervisada para el periodo 2018-2019.
- 2) Evaluar las diferencias entre sub-cuencas con respecto a temperatura, oxígeno, turbidez y concentración de nutrientes.

3) Evaluar la relación entre parámetros fisicoquímicos del agua y cobertura de suelo en la cuenca hidrográfica.

Metodología

2.1 Sitio de estudio.

La región de estudio se encuentra dentro de una zona uruguaya con temperaturas medias anuales entorno a los 18°C y precipitaciones medias anuales entre los 1200 y 1300 mm (**MVOTMA, 2007**). Desde el punto de vista geomorfológico es una planicie de inundación, con un posible origen tectónico, presencia de procesos acumulativos de sedimentos provenientes de la erosión de zonas más altas, materiales finos, sedimentos limo-arcillosos del holoceno y sedimentos aluviales recientes, con importante presencia de arcillas expansivas (montmorillonita) (**MVOTMA, 2012**). Estas acumulaciones de materiales erosivos han permitido la edafización del terreno, con una amplia diversidad de suelos en la planicie (**Achkar et al., 2007**).

La Cuenca del Río Queguay tiene aproximadamente 8.551 km² (sin tener en cuenta al Arroyo San Miguel); **Crossa & Lucas, 2017** identificaron en esta cuenca, 26 subcuencas del río Queguay mediante la utilización gratuita del Modelo de Elevación Digital (MED) perteneciente al producto ASTER (sitio web de USGS Earth Explorer). La investigación de esta tesina se llevó a cabo en seis subcuencas resultantes y en sus principales cuerpos de agua que desembocan hacia el Río Queguay dentro del Área Protegida Montes del Queguay.

El área protegida con recursos manejados, Montes del Queguay, dentro del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP) se encuentra ubicada en la confluencia de los ríos Queguay Grande y Chico, caracterizada por una densa masa forestal asociada y una rica historia socio-cultural y arqueológica (**Achkar et al., 2007, Litvosky & Urruty 2012**). En sus 19.969 hectáreas de extensión predominan los suelos inundables de elevada frecuencia, alta fertilidad, poca permeabilidad y drenaje imperfecto, lo que le otorga un ciclo de inundación y vaciado distintivo con prolongados períodos de

inundación (influenciado por los ríos Queguay Grande y Chico), y su lento vaciado (angosta y única salida al río Queguay); tal comportamiento aporta evidencias de que este sitio podría desempeñar un rol importante en la recarga del acuífero Guaraní **(MVOTMA, 2012)**. Además, en esta reserva natural también se encuentran distintos ambientes con una compleja distribución espacial que dan lugar a ecotonos, gracias a los procesos de acumulación, sedimentación y edafización, inundaciones periódicas, etc **(MVOTMA, 2012)**. En el área se pueden hallar tres divisiones ambientales:

- Tierras bajas, con cobertura arbórea, inundaciones duraderas, se encuentran ecosistemas de bañados, pajonales, lagunas y cursos fluviales **(Achkar et al., 2007)**.

- Monte ribereño, con cobertura mayormente arbórea, ubicado a lo largo del curso de agua, se encuentran bosque hidrófilos, intermedios, mesófilos y de albardón **(MVOTMA, 2012)**.

- Tierras altas, formadas por zonas no inundables **(Achkar et al., 2007)**.

En la actualidad, las subcuencas que rodean el área protegida se encuentran cubiertas en gran parte por áreas destinadas al uso agrícola-ganadera y forestal, pero la cobertura de suelo original de esa zona era de pastizal natural/seminatural.

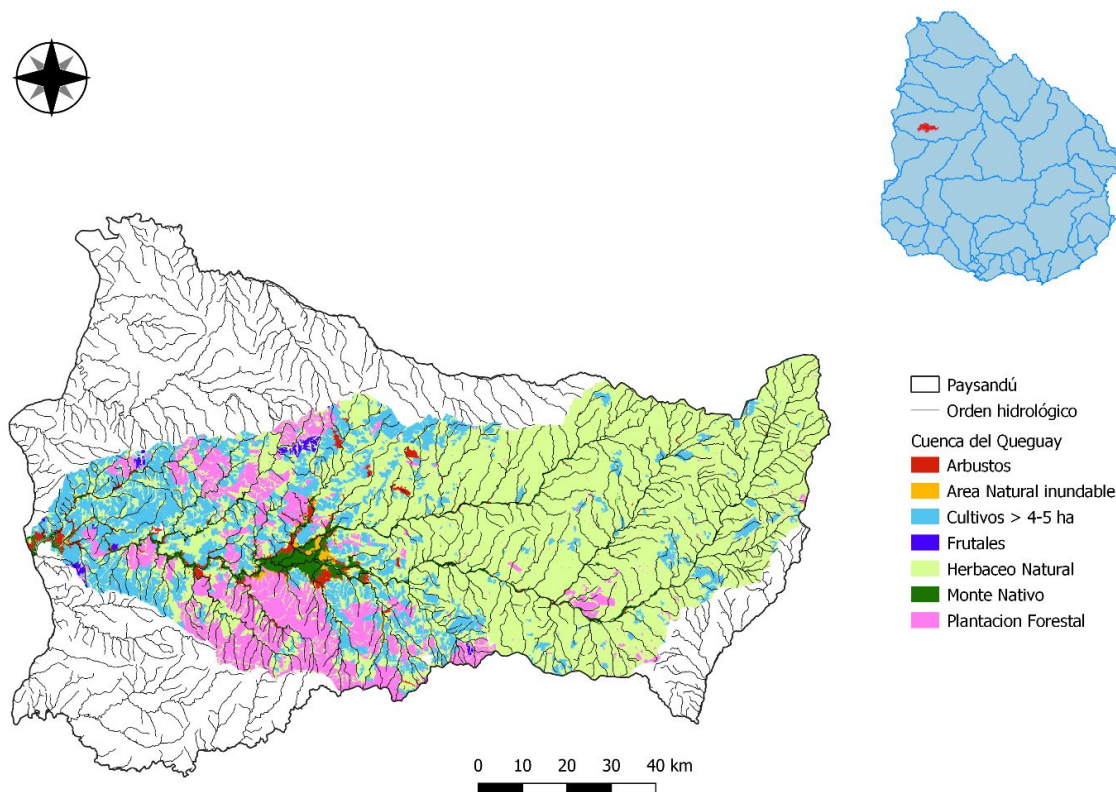


Figura 1. Arriba a la derecha: mapa de las cuencas hidrográficas y ubicación de Montes del Queguay (en rojo) en el Uruguay. En el centro: ubicación de la Cuenca del Río Queguay en el Departamento de Paysandú con las respectivas coberturas de suelo del año 2015. Adaptado de: **MVOTMA, 2019**.

2.2 Diseño del muestreo

Durante el periodo de 2016-2019, el Polo Ecología Fluvial - CENUR Litoral Norte (PEF) y la Intendencia de Paysandú realizaron la evaluación de parámetros fisicoquímicos en puntos de interés y de accesibilidad en la Cuenca del Queguay (Fig. 1). Los sitios de muestreo fueron seleccionados en base a demandas científicas y también a inquietudes de referentes locales respecto a la calidad del agua y los posibles efectos que podrían ocasionar las coberturas de suelo (CS) de las subcuencas. Los puntos de muestreo inicialmente fueron escogidos en función a los puntos de acceso a los arroyos y ríos ubicados en el área adyacente al Área Protegida "Montes del Queguay", aguas arriba de su desembocadura con el Río Queguay Grande.

En el marco de esta tesis, sólo se realizaron monitoreos durante la salida de campo el 11 de noviembre de 2019. El monitoreo puntual se desarrolló en los sitios: Río

Queguay Chico (QCH), Río Queguay Grande (QAP), Arroyo Santana (SAN), Arroyo Guayabo Grande (GGR), Arroyo Ñacurutú (NAC) y Arroyo Buricayupi (BUR) (Fig. 2). El resto de valores utilizados fueron obtenidos por el banco de datos del polo de Ecología Fluvial del CENUR Litoral Norte y datos del proyecto PRONECA llevado a cabo por el Departamento de Higiene de la Intendencia Departamental de Paysandú (IDP).

En las seis subcuencas se hizo el muestreo puntual de siete parámetros fisicoquímicos con un equipo multiparámetro marca HORIBA U50. El objetivo del monitoreo puntual de la calidad del agua fue recabar datos de parámetros fisicoquímicos (temperatura, oxígeno disuelto, pH, redox, conductividad, sólidos totales disueltos, salinidad y turbidez).

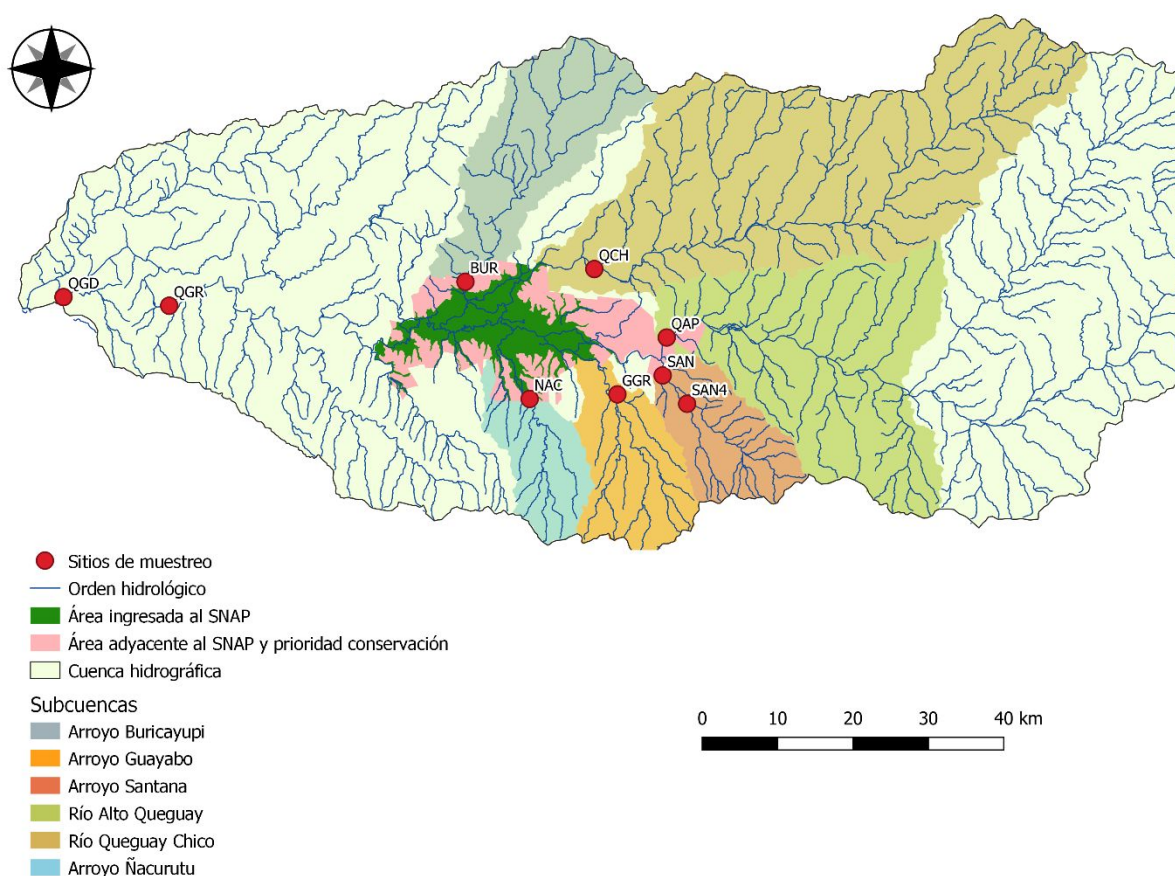


Figura 2. Mapa con la localización de las subcuencas de estudio y sitios de muestreo. QCH (Queguay Chico), QAP (Queguay Grande Andrés Pérez), QGR (Queguay Grande), QGD (Queguay Grande desembocadura), GGR (Guayabo Grande), SAN (Santana), NAC (Ñacurutú), BUR (Buricayupi). SAN4 (punto de muestreo del Arroyo Santana en el puente de la Ruta 4, aguas arriba del punto SAN). Adaptado de: **MVOTMA, 2019**.

Se aclara que los sitios de muestreo QGD y QGR fuera del área de estudio, se utilizaron como datos comparativos colectados solo por la IDP, ya que estos sitios representan la calidad de agua del Queguay antes de desembocar hacia el Río Uruguay. También se aclara que SAN y SAN4 son sitios en la misma cuenca hidrográfica, SAN4 representa la calidad de agua en el puente Ruta 4 y SAN aguas más abajo.

2.3 Adquisición de las imágenes del terreno

La obtención de las imágenes satelitales del área se descargaron a partir del servicio online EarthExplorer correspondiente al United States Geological Survey (USGS).

El satélite seleccionado para tal cometido fue Sentinel-2 (S2), el cual incluye una combinación de datos procedentes de las misiones Sentinel 2A y 2B lanzados en los años 2015 y 2017 respectivamente **(ESA Earth online, 2019)**.

Los sensores de S2 (Tabla 1) poseen una resolución espacial de 10, 20 y 60 m dependiendo de la banda considerada; una resolución espectral que comprende 13 bandas que van desde el espectro visible (VNIR) e infrarrojo cercano (NIR) hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR); además la resolución temporal posee una frecuencia de nueva visita de 10 días (cada satélite) y la visita combinada es de 5 días **(ESA Sentinel online, 2019a)**.

Número de banda y dominio espectral	S2A		S2B		Resolución espacial (m)
	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	
1 - Aerosoles	442.7	21	442.2	21	60
2 - Azul	492.4	66	492.1	66	10
3 - Verde	559.8	36	559.0	36	10
4 - Rojo	664.6	31	664.9	31	10
5 - Borde rojo vegetal	704.1	15	703.8	16	20
6 - Borde rojo vegetal	740.5	15	739.1	15	20
7 - Borde rojo vegetal	782.8	20	779.7	20	20
8 - NIR	832.8	106	832.9	106	10
8A - Borde rojo vegetal	864.7	21	864.0	22	20
9 - Vapor de agua	945.1	20	943.2	21	60
10 - Detección de cirros	1373.5	31	1376.9	30	60
11 - SWIR	1613.7	91	1610.4	94	20
12 - SWIR	2202.4	175	2185.7	185	20

Tabla 1. Conjunto de bandas espectrales pertenecientes a los satélites S2 A y S2 B coloreado acorde a la resolución espacial indicado en la última columna. Adaptado de: **ESA Sentinel Online, 2019b**.

La selección de imágenes se basó en la obtención de seis capturas satelitales (Tabla 2) para los años 2018-2019 y para los mismos meses en ambos (febrero, junio, octubre) con el criterio de cubrir la variabilidad anual de las diferentes CS. Solo se eligieron imágenes con presencia de nubes menor al 10% y los archivos se descargaron en formato JPEG2000.

Año 2018	Año 2019
23 de febrero	18 de febrero
18 de junio	8 de junio
16 de octubre	6 de octubre

Tabla 2. Fechas correspondientes a las imágenes satelitales obtenidas a través del sitio web de Earth Explorer (USGS).

2.4 Determinación de las imágenes.

Los archivos satelitales descargados de tipo Raster (mapa de bits) se importaron en QGIS (versión 3.4 Madeira) a través del Semi-Automatic Classification Plugin (SCP). Mediante la combinación de bandas y construcción de índices, se pueden distinguir en una imagen, objetos con distintas características espectrales (**Pettorelli et al., 2018**).

Con este propósito, se realizaron múltiples composiciones de bandas con el objetivo de incrementar la información visual de la CS y elegir la opción más óptima para discriminar las distintas clases que cubren el terreno.

Se comprobaron varias combinaciones con el SCP, e índices con la herramienta "Raster Calculator", tomando como referencia las combinaciones de bandas disponible en Sentinel Hub (plataforma GIS basada en la nube para la distribución, gestión y análisis de datos satelitales) (**Sinergise, 2019**). Entre estas pruebas se testearon las composiciones RGB de bandas para la vegetación en color natural (4-3-2) infrarrojo (8-4-3), vegetación saludable (8-11-2), agricultura (11-8-2) y los índices NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada), y NDWI (Índice de agua de diferencia normalizada) (Fig. 3).

Las combinaciones de bandas RGB sumado a los índices vegetales fueron utilizados en paralelo con la meta de seleccionar la combinación más adecuada para la diferenciación de clases para la situación de este trabajo, pero además cada una de estas composiciones tuvo fortalezas y desventajas al momento de discriminar entre clases. A su vez, cada una otorgó evidencia acerca de lo que se estaba evaluando y ayudó en el reconocimiento y comprensión de la zona.

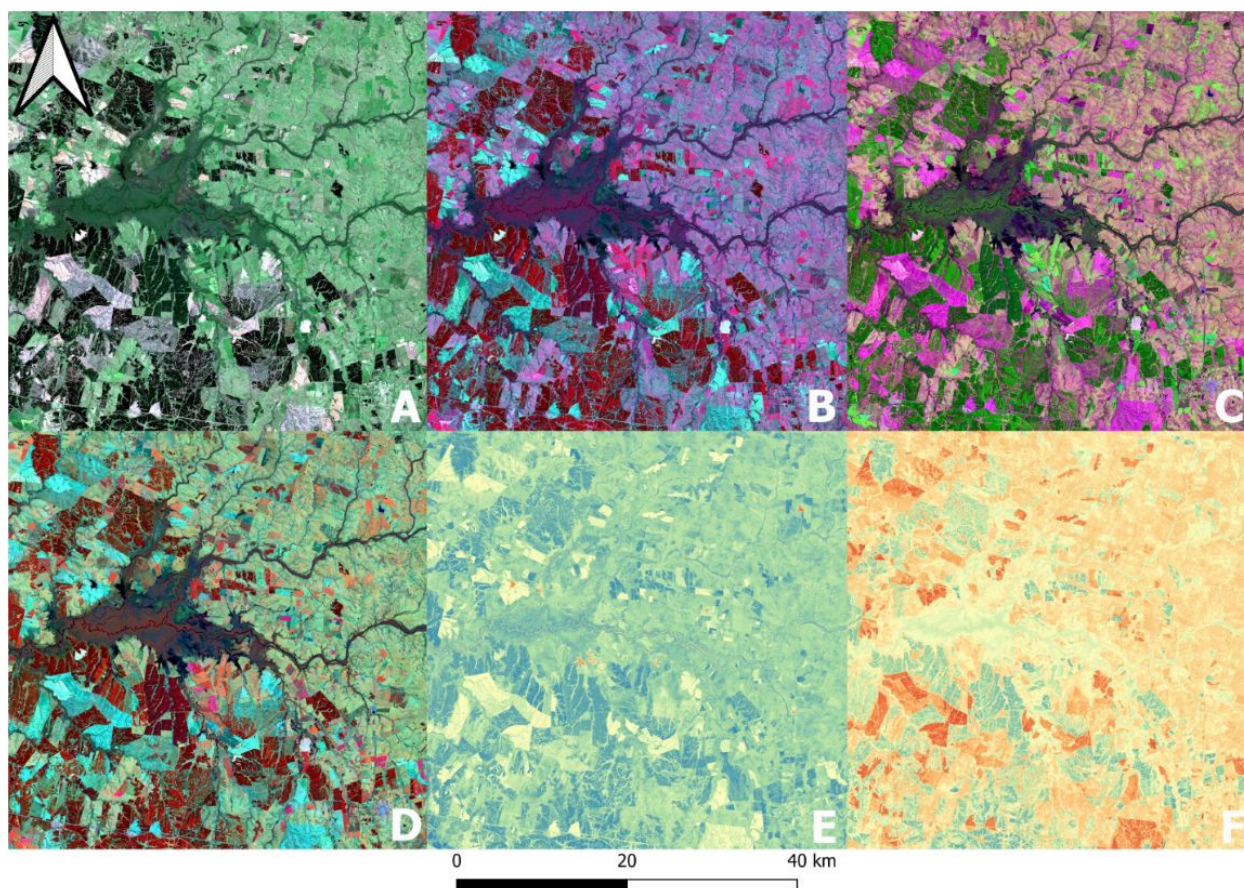


Figura 3. Composición de bandas e índices de prueba sobre un recorte de la zona de estudio en color natural (A), infrarrojo (B), agricultura (C), vegetación saludable (D), NDVI (E) y NDWI (F) correspondientes al mes de octubre de 2019.

A continuación se describen brevemente los índices y composiciones utilizadas.

- **NDVI:** este es el indicativo vegetal más comúnmente utilizado, está basado en que la vegetación fotosintéticamente activa absorbe fuertemente luz roja y refleja la radiación infrarroja cercana (**Pettorelli et al., 2018**). Es muy popular en cuanto al mapeo de la condición del ecosistema con fines de monitoreo y conservación (**Pettorelli, 2013**).

Se lo define como $(NIR - R) / (NIR + R)$ y para el caso de las bandas (B) de S2 su fórmula es $(B8 - B4) / (B8 + B4)$ (**Sinergise, 2019**).

- **NDWI:** es muy sensible a la variación en el contenido del agua del dosel y por tanto tiene importantes aplicaciones en agricultura y forestación ya que puede ser usado como un estimativo de la cantidad de agua presente en las cubiertas vegetales (**Bo-Cai Gao, 1996**). Se lo define como $(NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$ (**Bo-Cai Gao, 1996**) y

para el caso de las bandas de S2 su fórmula es $(B8 - B11) / (B8 + B11)$ (**Sinergise, 2019**).

- Color natural: es el resultado de la combinación de las tres bandas visibles (2, 3 y 4), cada una de estas asignada a su verdadero color, lo que proporcionó una aproximación semejante y resaltada en comparación a los colores reales.

- Infrarrojo: es una combinación con elevada sensibilidad a la vegetación verde, consecuencia de la alta reflectividad en el NIR mientras que la clorofila y el agua tiene una alta absorbancia en el rojo (**Colorado State University, 2018**). Las distintas tonalidades de este color indican una vegetación saludable y desarrollada, rosado para zonas vegetales con menos densidad, celeste para suelo desnudo debido a la deforestación o cosechado, azul oscuro o negro para los cuerpos de agua o terrenos asociados a este.

- Vegetación saludable: enfocado en la detección de vegetación vigorosa.

- Agricultura: especializado en el análisis de zonas con cobertura agrícola, donde estas aparecieron en colores verdes claros y radiantes, vegetación vigorosa de plantaciones forestales en verde oscuro, tonalidades entre rosado y verde para terrenos vegetales con escasa densidad, rosado fluorescente para suelo desnudo, violeta oscuro o negro para los cuerpos de agua o terrenos asociados a este.

2.5 Verificación en campo

El 11 de noviembre de 2019, además de muestrear la calidad del agua en los seis sitios del área de estudio, a su vez, se realizó una campaña de “ground-truthing” (metodología estándar de validación a campo de la asignación de clases de CS por teledetección) de la zona. Con ayuda del guardaparque del área protegida Montes del Queguay, se registraron 65 puntos con GPS (Fig 4.) eligiendo capas de interés para corroborar posteriormente en la clasificación de la CS. En conjunto con otros puntos de las campanas de PEF y SNAP, en total se registraron aproximadamente 130 datos de cobertura abarcando: pastizales naturales/semi-naturales sobre suelos arenoso y basálticos, suelos deforestados y cosechados, plantaciones forestales de eucaliptos jóvenes y maduros, agrupaciones aisladas de pinos, álamos y algarrobos, diversos

cultivos, bosque nativo, chircales, humedales y cuerpos de agua artificiales y naturales. La obtención de estos registros dependió de la accesibilidad de los caminos e insumos del viaje (tiempo y combustible), comprendiendo entre 5 y 20 registros por cobertura. Este paso fue vital para comparar los datos *in situ* del lugar con una imagen satelital (6 de octubre de 2019) próxima a la fecha de salida en campo para familiarizarse con los patrones de colores, sombras y formas proyectadas de las variadas CS al momento de dividir en clases y clasificar el terreno.

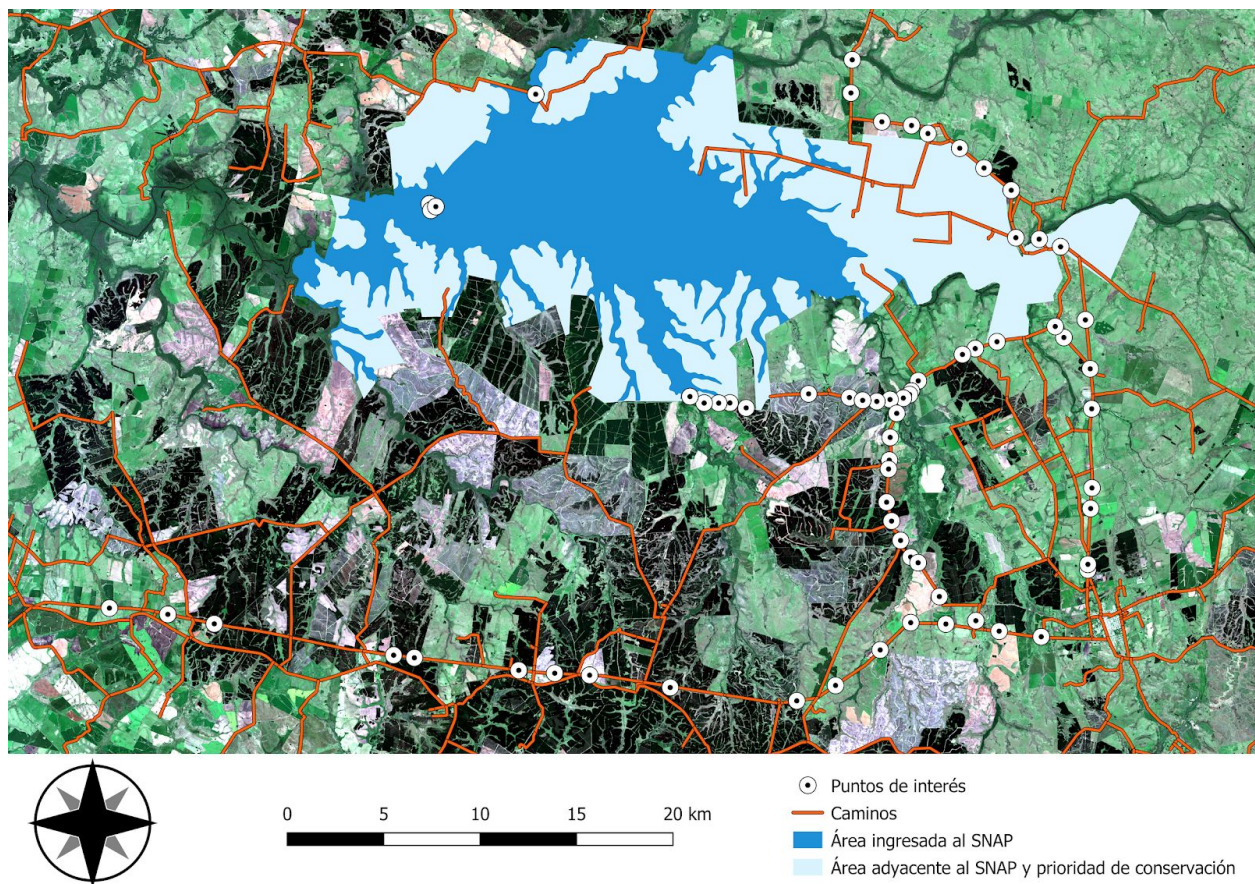


Figura 4. Puntos (N = 65) de interés registrados por GPS en la fecha 11-Nov-2019, superpuesto sobre una captura S2 en composición RGB 4-3-2: color natural del 6 octubre de 2019.

2.6 Clasificación de las imágenes

Para la clasificación de las imágenes, se ejecutó la técnica llamada clasificación supervisada sobre el terreno que abarca las seis cuencas (captura satelital entera sin

recortar), y sobre cada captura satelital (Tabla 2), es decir, se realizaron seis clasificaciones supervisadas en total.

Esta técnica utiliza algoritmos de aprendizaje artificial para distinguir clases discretas de cobertura del terreno en base a muestras o áreas de entrenamiento ingresadas por el usuario con conocimiento previo del lugar de estudio; la técnica identifica las agrupaciones de píxeles que comparten características similares respecto a otros cercanos y estas agrupaciones son etiquetadas bajo un mismo tipo de clase (**Pettorelli et al., 2018**).

Las “regiones de entrenamiento” (ROIs, del inglés “Regions of interest”) se refieren a áreas cuyas clases son conocidas *a priori* y que se usan para generar la firma espectral característica de cada una de las clases. Estas muestras de entrenamiento se digitalizaron a mano sobre la composición elegida RGB “agricultura” (11-8-2) y además se utilizaron (sólo como insumo) para la interpretación visual las otras composiciones de bandas, índices y reconocimiento del terreno in situ con la utilización del complemento SCP. La composición “agricultura”, se consideró la opción más óptima para la realización de las clasificaciones por su elevado contraste y capacidad de diferenciación entre coberturas.

El trazado de las ROIs (Fig. 5) se realizó desde cero para cada fecha de la tabla 2 y se tuvo en cuenta registrar siete clases de interés: plantación forestal (eucaliptos jóvenes y maduros), suelo desnudo (ocasionado tanto por actividad forestal o agrícola), cultivo, agua (corrientes naturales y cuerpos artificiales), área inundable, pastizal natural/seminatural y bosque nativo. Dicha selección de clases se basó en una simplificación de las coberturas con mayor distribución y ocupación que comprenden la zona.

En la delimitación de estas áreas, se siguió el criterio expresado por **González et al., 2013**, quienes recomiendan ROIs de gran tamaño para cada clase y con una amplia distribución en todo el terreno para capturar un amplio rango de información digital.

En la Figura 5 se expone como ejemplo, las ROIs creadas en el mapa del 16 de octubre de 2018. La distribución y número de polígonos fue similar entre todas las

fechas abarcando las seis subcuencas de estudio, más el área protegida y adyacente declarada por el SNAP. Para el caso de la Figura 5 se trazaron 104 polígonos en total con 15 polígonos para cada clase aproximadamente. Sus áreas estuvieron comprendidas entre las 1.1 y 762.6 hectáreas.

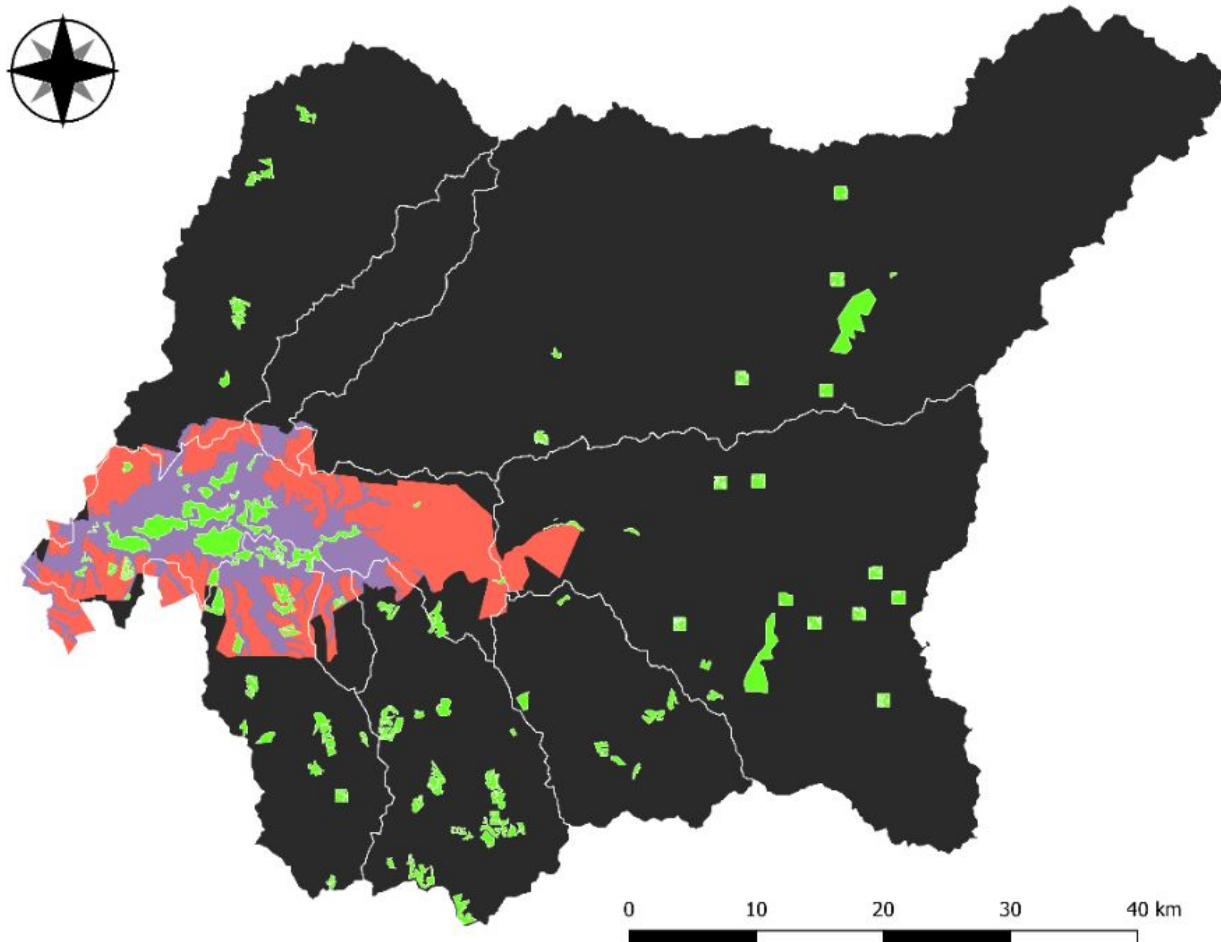


Figura 5. Mapa de diversas subcuencas con las ROIs definidas (16 de octubre de 2018). Línea blanca: límite entre subcuencas. En negro: subcuencas. En verde: ROIs. En violeta: área ingresada al SNAP. En rojo: área adyacente al área ingresada al SNAP y con prioridad de conservación.

A continuación se emplearon los módulos de GRASS *v.to.rast* (conversión de formato vectorial a raster), *i.gensig* (extracción de firmas espectrales) e *i.maxlik* (clasificación de la reflectancia espectral de los píxeles basado en el algoritmo “Maximum Likelihood” (Grass development team, 2019).

Este último algoritmo, es considerado uno de los que proporciona mejores resultados, asume que los cálculos estadísticos para cada clase en cada banda obedecen a una distribución normal y calcula la probabilidad de pertenencia de cada píxel a una clase específica (todos los píxeles son clasificados a menos que se especifique un umbral) (González *et al.*, 2013).

Como punto final, se calculó el porcentaje de clases que componen la CS de cada subcuenca con utilización de la capa raster creada por la clasificación supervisada y una capa de tipo vectorial con la división en microcuencas de estudio con el fin de enmascarar a la capa anterior y extraer las áreas de cada clase (Fig. 6).

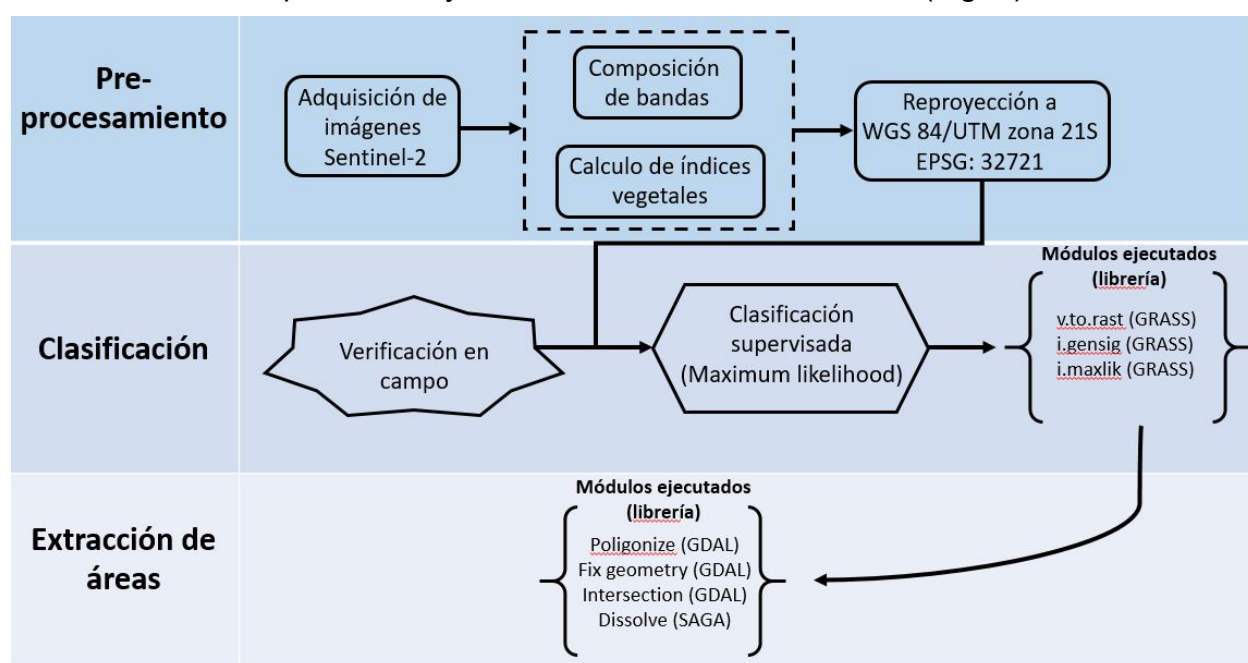


Figura 6. Diagrama de flujo con la metodología implementada en el estudio entre 2018-2019.

2.7 Datos climáticos

Los datos de precipitación acumulada y temperatura promedio (Tabla 3, Fig. 7 y 8) se utilizaron para considerar tanto las condiciones climáticas previas al muestreo de agua, como también las condiciones climáticas en las fechas de las imágenes satelitales utilizadas para la clasificación supervisada de la CS, a los efectos de evaluar posibles errores en las coberturas. Ambos datos fueron provistos por **INIA 2019**, estación

Tacuarembó, por ser la estación meteorológica que representa las condiciones en la cuenca alta del Queguay, y de donde provienen las aguas de inundación.

	Precipitación acumulada (mm)		Temperatura promedio (°C)	
Período	2018	2019	2018	2019
Enero	37.3	362.7	24.83	23.72
Febrero	64.9	111.8	23.51	23.26
Marzo	64	40.3	20.58	21.12
Abril	62.1	157	21.58	19.29
Mayo	207.6	99.1	15.36	15.46
Junio	29.3	91.3	10.61	15.45
Julio	193	144.9	11.62	11.36
Agosto	147.3	153	11.56	12.46
Septiembre	250.7	102.8	17.02	14.07
Octubre	35	446.3	17.05	17.61
Noviembre	99.1	120.8	20.54	21.13
Diciembre	177.2	No registrado	21.32	No registrado

Tabla 3. Valores mensuales de precipitación acumulada y temperatura promedio, estación INIA Tacuarembó. En amarillo: meses correspondientes a las capturas satelitales.

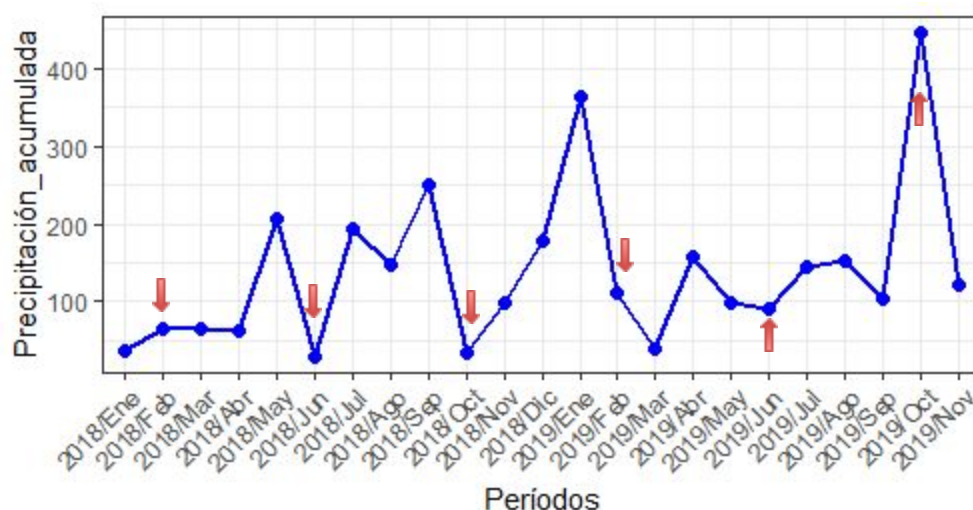


Figura 7. Serie temporal de precipitación acumulada mensual (línea azul) medido en mm durante el estudio 2018-2019. Flechas en rojo indican meses correspondientes a las capturas satelitales indicadas en la Tabla 2.
Fuente de datos: INIA - Estación Tacuarembó.

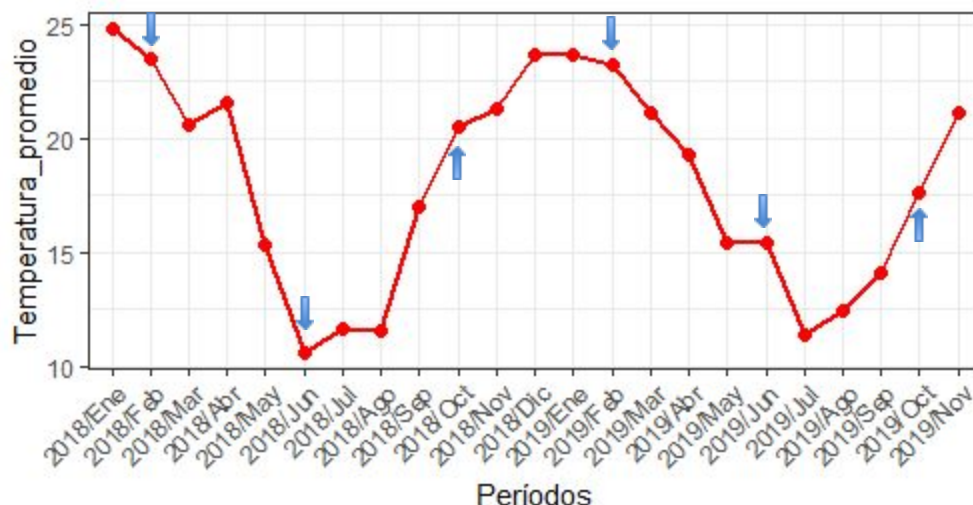


Figura 8. Serie temporal de temperatura promedio mensual (línea roja) medido en °C. Flechas en azul: meses correspondientes a las capturas satelitales indicados en la Tabla 2.

Fuente de datos: INIA - Estación Tacuarembó.

2.8 Análisis estadístico

Para evaluar la normalidad de la distribución de las variables de interés de calidad de agua comprendidas entre los años 2018-2019 de las subcuencas de estudio (temperatura, turbidez, oxígeno disuelto, nitrato, amonio, fósforo total), se realizó Shapiro-Wilk tests y su distribución se representó mediante histogramas (Fig. 9).

Las diferencias entre subcuencas de los parámetros fisicoquímicos del agua se evaluaron utilizando las pruebas no-paramétricos post-*hoc* Dunn's test, considerando un valor $p < 0.05$. Dichos resultados se visualizaron mediante representación de cuartiles en gráficos "boxplot".

La variabilidad de parámetros fisicoquímicos en el tiempo se visualizó mediante gráficos de Series Temporales para cada parámetro.

Finalmente, para evaluar la correlación entre nutrientes en el agua y porcentajes de CS en las subcuencas usamos modelos de regresión lineal (variable independiente $x = \text{porcentaje de CS}$, variable dependiente $y = \text{concentración de nutrientes}$) y coeficientes de correlación de Pearson.

Todas los análisis estadísticos y representaciones gráficas se realizaron en lenguaje R versión 3.6.2 (R Core Team 2019) en la plataforma RStudio (versión 1.2.1335)

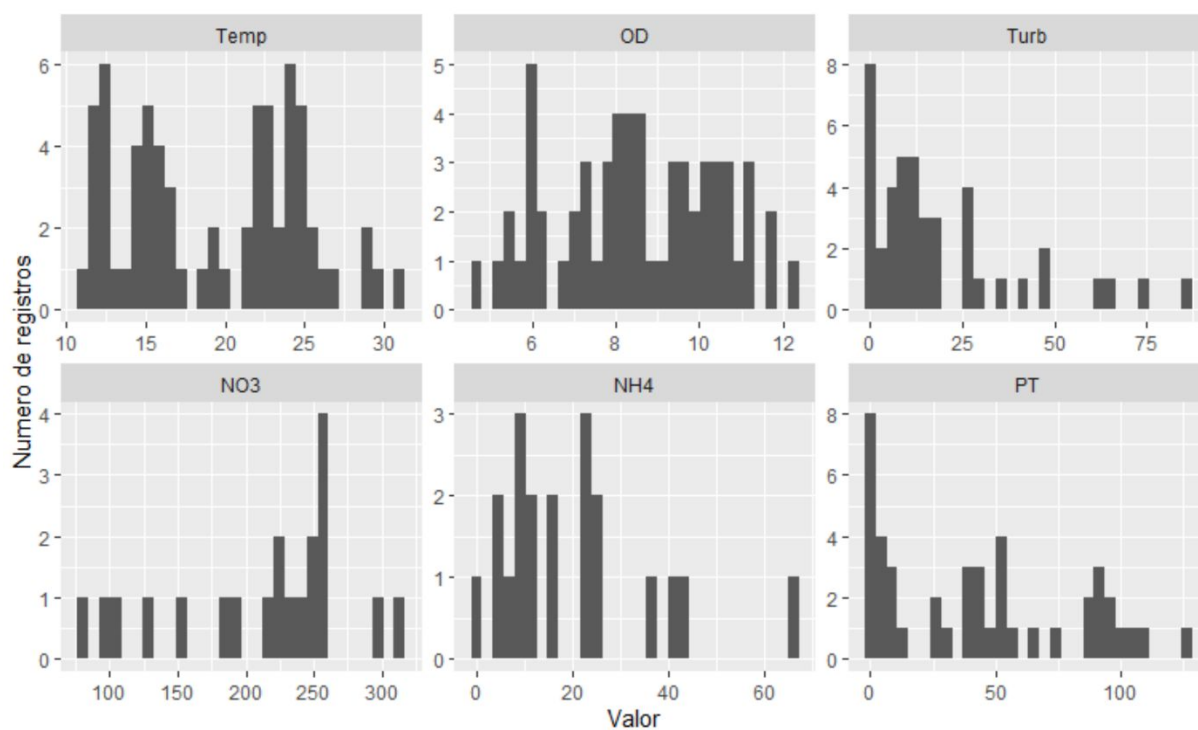


Figura 9. Histograma con la distribución del número de registros y sus valores correspondientes para los distintos parámetros fisicoquímicos de todos los cursos de agua del estudio. Temperatura: Temp (°C), oxígeno disuelto: OD (mg/L), turbidez: Turb (NTU), nitrato: NO3 (ug/L), amonio: NH4 (ug/L), fósforo total: PT (ug/L).

Resultados

3.1 Clasificación supervisada de las coberturas de suelo en las subcuencas del Río Queguay.

Durante el periodo de febrero 2018 - octubre 2019, las clasificaciones mostraron diferencias en las CS que se aluden a las actividades productivas humanas y las variaciones climáticas (Fig. 10, 11, 12, 13). En particular, para los meses de febrero en ambos años, y especialmente para 2018 (Fig. 10), se registró una elevada extensión de la clase ‘suelo desnudo’ en el territorio que es normalmente ocupado en su mayor parte por pastizal natural/seminatural. Es importante aclarar que esta visualización de suelo desnudo no corresponde con áreas de deforestación o cosechado reciente, sino que se interpreta como zonas de vegetación de bajo verdor potencialmente con escasa biomasa aérea verde, relacionado con periodos de déficit hídrico ocasionado por mayores temperaturas y menores precipitaciones (Fig. 7, 8). Sin embargo, esto es un grave error en la clasificación ya que no se puede adjudicar campo natural o seminatural con poca biomasa y déficit hídrico a un suelo desnudo de pre o post cosecha. Tampoco, se posee suficiente información para afirmar que las condiciones climáticas son suficientes para producir una hipotética sequía de tal magnitud en el terreno. Por otro lado, en febrero de 2018 también se registraron grandes superficies de agua sobre las subcuencas de Ñacurutú, Santana y Guayabo. Sin embargo, esto fue otro error en la clasificación, ya que luego de una minuciosa inspección visual de las capturas originales, se determinó que había presencia de aerosoles en la captura satelital que el software dedujo que pertenecía a la clase “agua”. Este tipo de fenómenos que interfieren con el análisis de imágenes son muy difíciles de eliminar y generalmente se corrigen mediante trazado manual post clasificación (**Baeza, pers. com. 2020**).

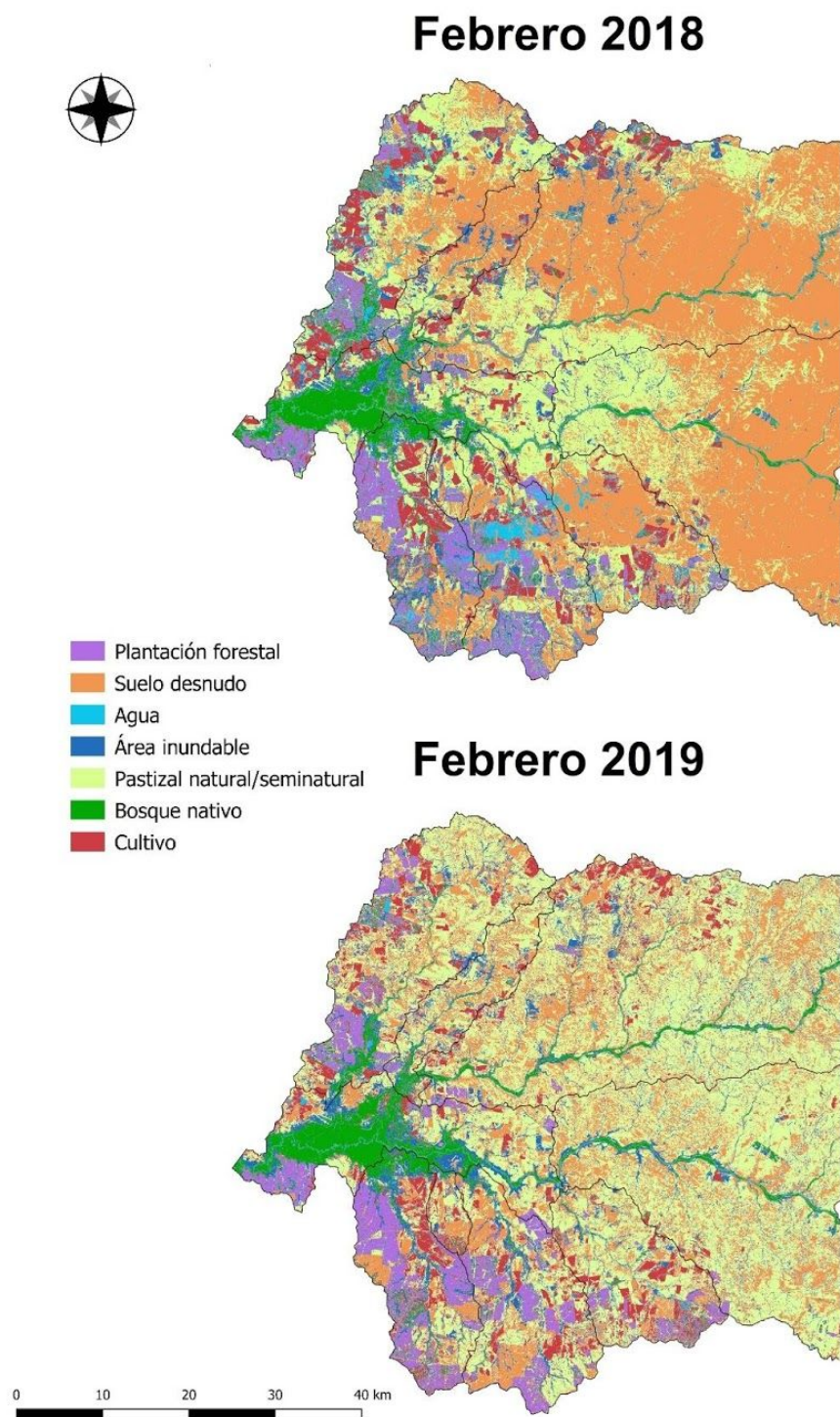


Figura 10. Clasificación supervisada de la CS para los meses de febrero 2018 y 2019. En línea negra: separación entre subcuencas.

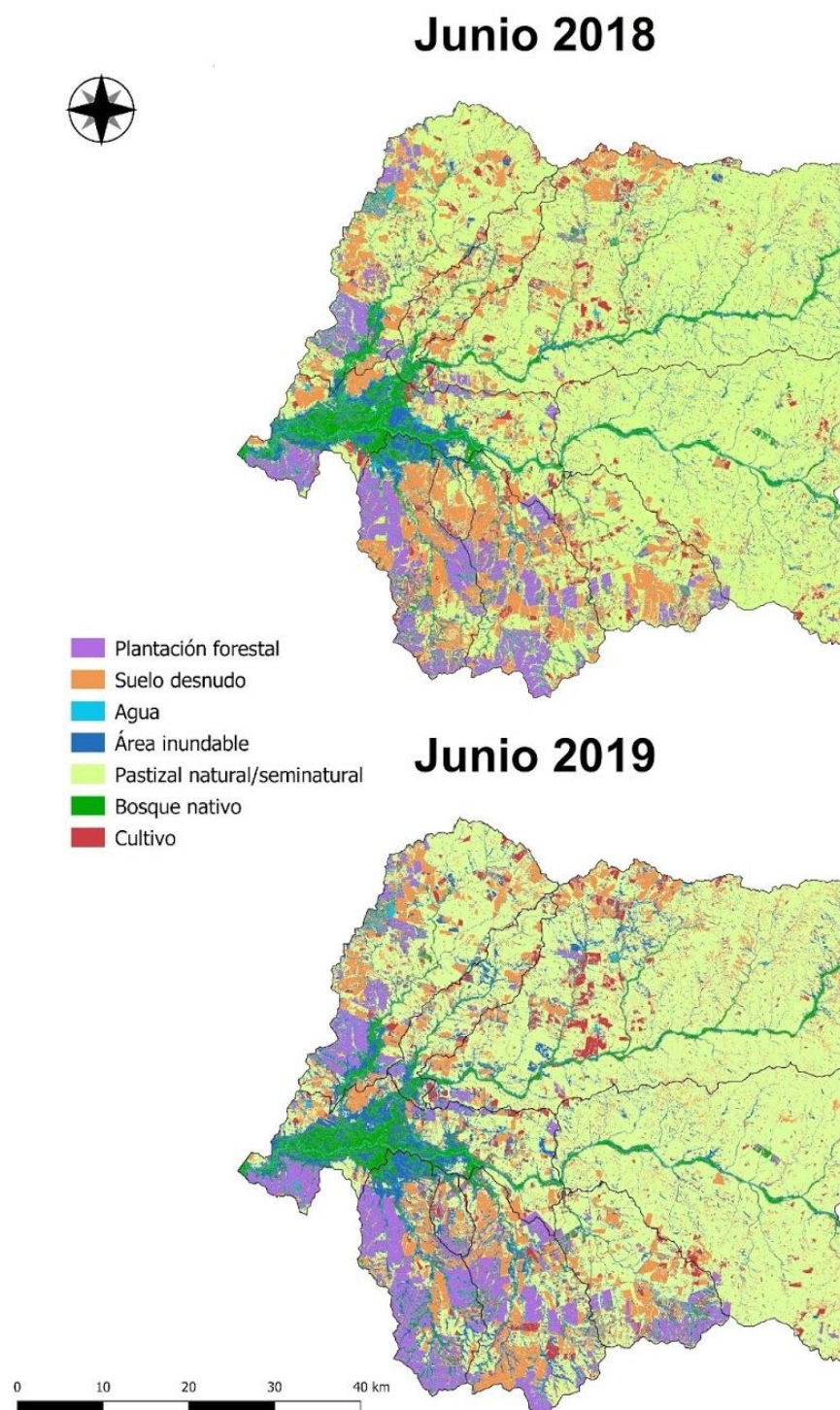


Figura 11. Clasificación supervisada de la CS para los meses de junio 2018 y 2019. En línea negra: separación entre subcuencas.

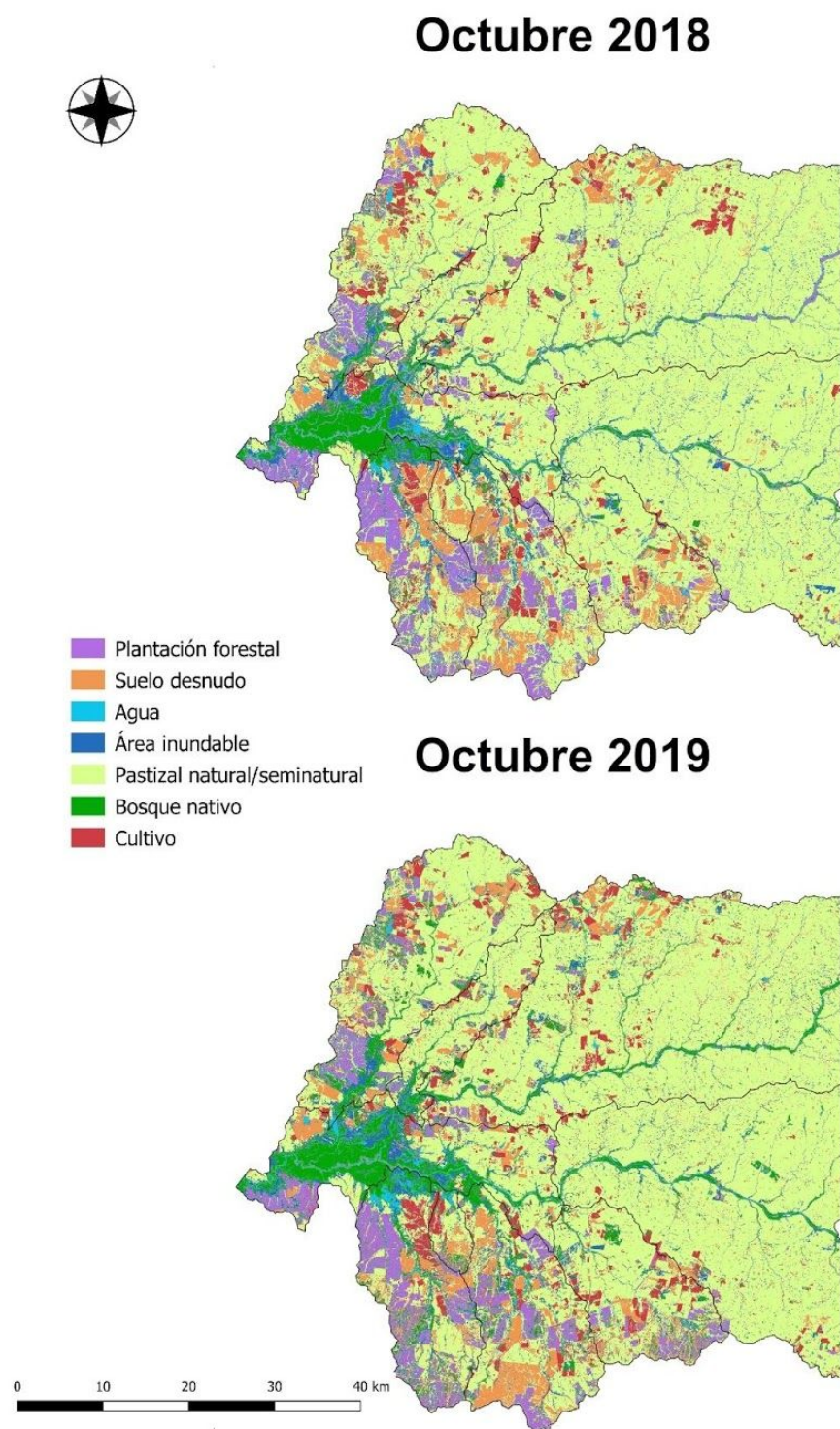


Figura 12. Clasificación supervisada de la CS para los meses de octubre 2018 y 2019. En línea negra: separación entre subcuencas.

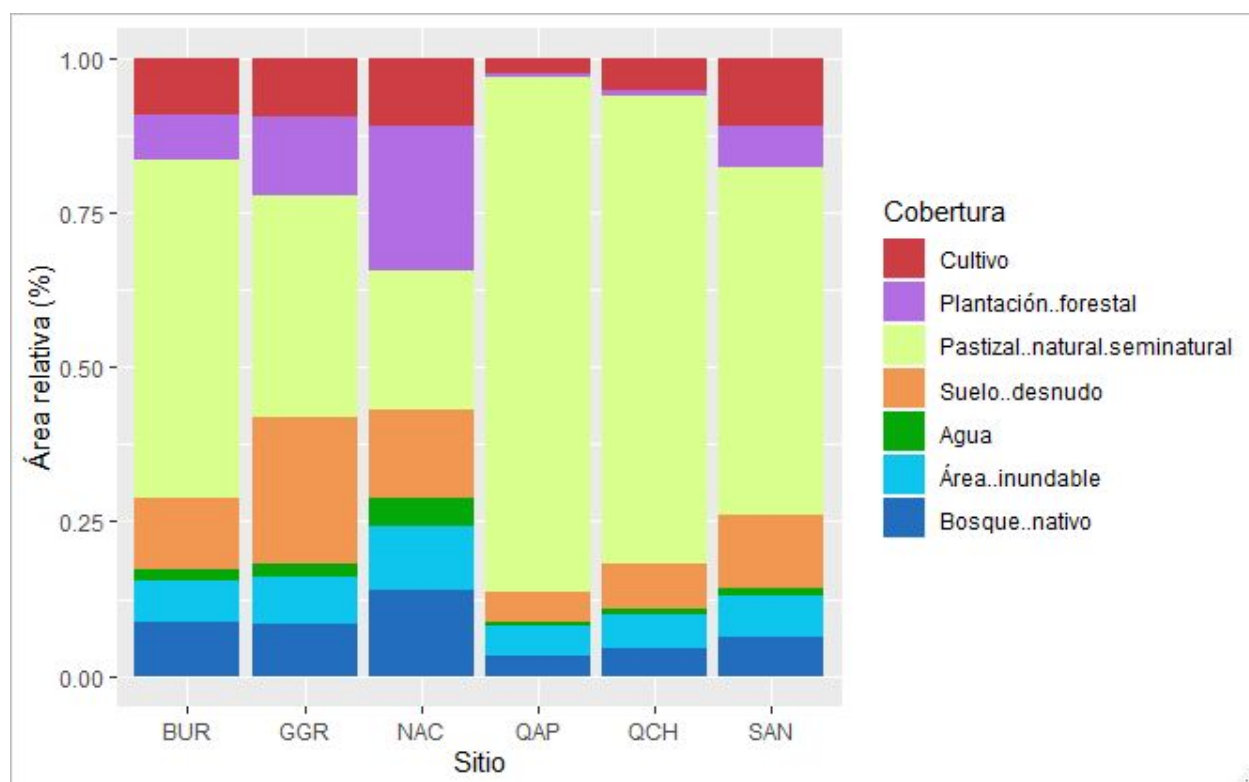


Figura 13. Área relativa (%) de CS en base de imágenes S2 de la fecha **octubre 2019** calculada para las seis subcuencas de estudio. La clase “suelo desnudo” representa la combinación de suelos designados para uso de cultivo, forestación, como también pastizal natural/seminatural u otras coberturas que en la fecha del imagen tienen baja cobertura de vegetación verde - esta fuente de error no se pudo corregir en esta tesis.

3.2 Evaluación de las diferencias entre sub-cuencas en temperatura, oxígeno, turbidez y concentración de nutrientes.

Según los resultados del test *post-hoc* de Dunn para los casos de las variables de temperatura, NO₃ y NH₄ entre los diferentes sitios, no se hallaron diferencias significativas en los valores promedios entre sitios (Fig. 14). Esto se puede deber en parte al menor número de muestreos de NO₃ y NH₄ en los sitios de estudio, particularmente para determinar si los altos niveles de NH₄ mayores de 40 ug/L registrados en el sitio Queguay Chico (QCH) son significativos. En cambio, para el oxígeno disuelto, turbidez y PT, si se registraron diferencias significativas entre varios sitios (Tabla 4). Entre ellos, se destacaron los valores menores de turbidez del Arroyo Ñacurutú en comparación a los ríos mayores, Queguay Grande (QAP) y Queguay Chico (QCH) (Fig. 14, Tabla 4). Esto se debe en parte a la gran variabilidad en turbidez

que tienen los ríos mayores en función a los pulsos hidrológicos en comparación con algunos arroyos de porte menor.

En términos de PT, se registraron valores mayores a 50 ug/L en los arroyos menores, Guayabo Grande (GGR) y Buricayupí (BUR), en comparación a los ríos Queguay Grande (QAP), Queguay Chico (QCH), y el Queguay Grande (QGR) aguas abajo en el puente de la Ruta 3 (Fig. 14). Es interesante que el curso Queguay Chico registró los valores menores de PT pero valores mayores de NH₄ (Fig. 14).

En la Figura 15, se pueden apreciar los múltiples monitoreos de nutrientes y la variabilidad de estos valores de nutrientes en el tiempo en sus respectivos sitios.

Algunos sitios mostraron un pico de fósforo total y turbidez en los meses de verano de enero y niveles más bajos de PT en los meses de invierno de junio a agosto.

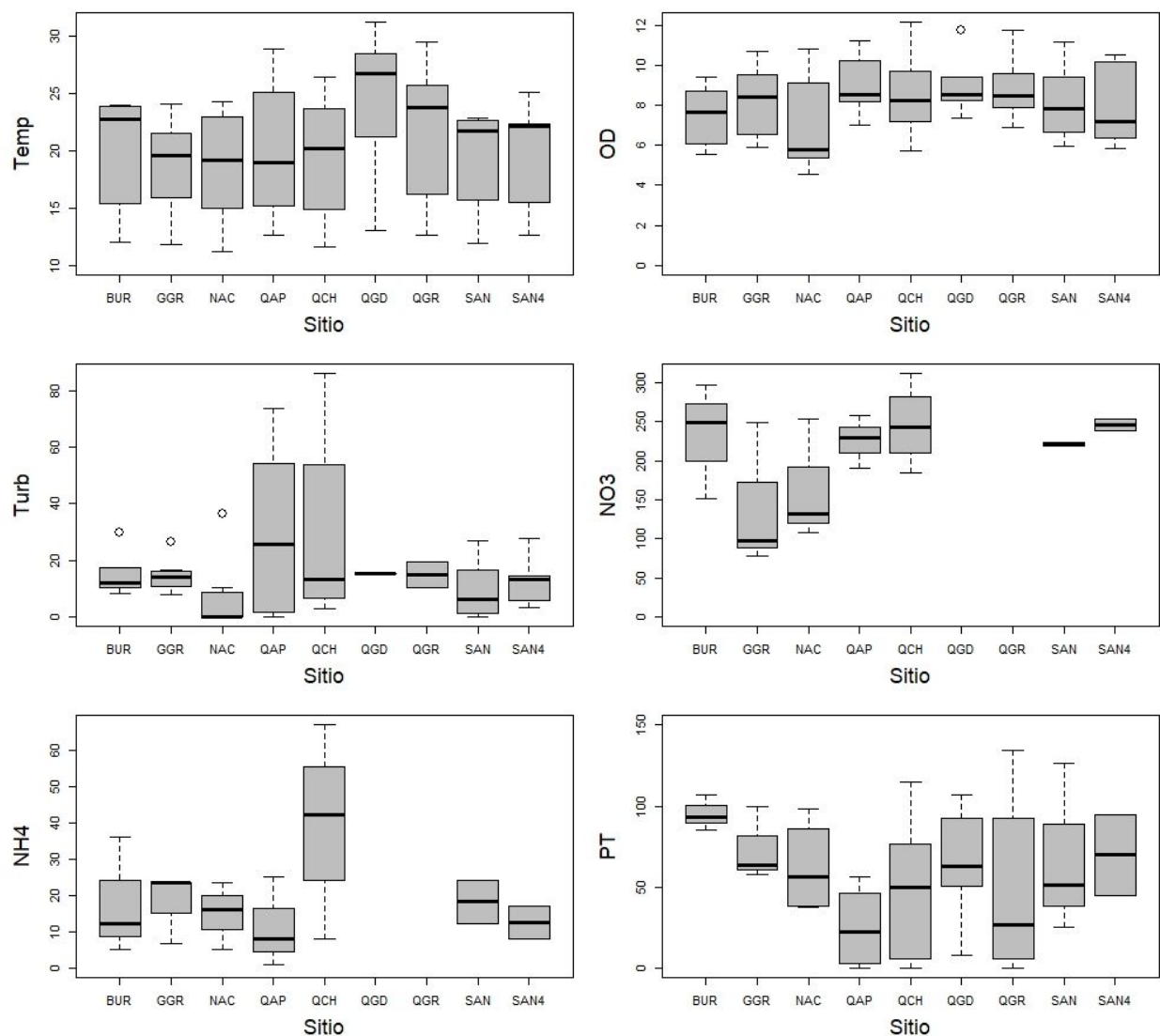


Figura 14. Gráficos Box-whisker. Box representado por percentiles 25%(Q1), 50%(mediana) y 75%(Q3) Whisker representado por whisker superior = $\min(\max(x), Q3 + 1.5 * IQR)$, whisker inferior = $\max(\min(x), Q1 - 1.5 * IQR)$ de los parámetros fisicoquímicos y los distintos sitios de muestreo. Temperatura: Temp (°C), oxígeno disuelto: OD (mg/L), turbidez: Turb (NTU), nitrato: NO3 (ug/L), amonio: NH4 (ug/L), fósforo total: PT (ug/L). QCH (Queguay Chico), QAP (Queguay Grande Andrés Pérez), QGR (Queguay Grande), QGD (Queguay Grande desembocadura), GGR (Guayabo Grande), SAN (Santana), NAC (Ñacurutú), BUR (Buricayupí). SAN4 (punto de muestreo del Arroyo Santana en el puente de la Ruta 4, aguas arriba del punto SAN).

Parámetro	Sitios con diferencias	Valor p
Turbidez	NAC-QAP	0.0122
	NAC-QCH	0.0041
	QCH-SAN	0.0173
Oxígeno disuelto	NAC-QAP	0.017
	NAC-QGR	0.0125
Fósforo total	BUR-QAP	0.0027
	BUR-QCH	0.0065
	BUR-QGR	0.0049
	GGR-QAP	0.0096
	GGR-QCH	0.0204
	GGR-QGR	0.0147

Tabla 4. Parámetros con diferencias significativas entre según el test no paramétrico de Dunn. QCH (Queguay Chico), QAP (Queguay Grande Andrés Pérez), QGR (Queguay Grande), QGD (Queguay Grande desembocadura), GGR (Guayabo Grande), SAN (Santana), NAC (Ñacurutú), BUR (Buricayupí).

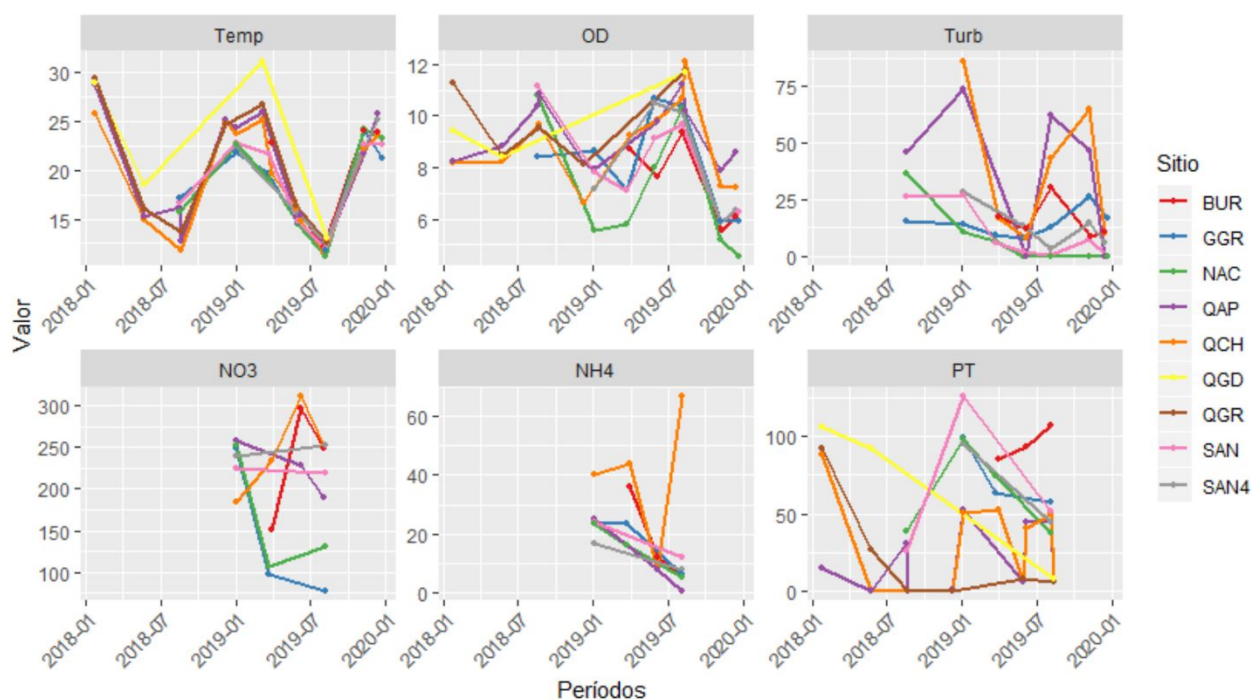


Figura 15 .Variabilidad de parámetros fisicoquímicos en el tiempo. Temperatura: Temp (°C), oxígeno disuelto: OD (mg/L), turbidez: Turb (NTU), nitrato: NO3 (ug/L), amonio: NH4 (ug/L), fósforo total: PT (ug/L). QCH (Queguay Chico), QAP (Queguay Grande Andrés Pérez), QGR (Queguay Grande), QGD (Queguay Grande desembocadura), GGR (Guayabo Grande), SAN (Santana), NAC (Ñacurutú), BUR (Buricayupí). SAN4 (punto de muestreo del Arroyo Santana en el puente de la Ruta 4, aguas arriba del punto SAN).

3.3 Evaluación de la relación entre parámetros fisicoquímicos del agua y cobertura de suelo en la cuenca hidrográfica.

Respecto a la hipótesis que existe una relación entre los parámetros de calidad de agua y la cobertura de suelo en la subcuenca hidrográfica, se encontraron tres relaciones significativas según los modelos de regresión lineal (Tabla 5).

	Cultivo	Pradera	Eucalipto	Suelo desnudo
NO3	3.39/0.08	5.89/0.03*	5.90/0.029*	0.44/0.51
NH4	0.01/0.93	0.17/0.68	1.69/0.21	2.43/0.14
PT	6.73/0.02*	0.81/0.38	1.95/0.18	1.95/0.18

Tabla 5. Modelo de regresión lineal. Valores por celda: estadístico F/valor p. (*) $p < 0.05$. Valores en letra negrita: resultados significativos.

Es importante destacar que todas las subcuencas tienen combinaciones de coberturas, por ende en la interpretación de datos hay que considerar el impacto integrado de todas las CS en la subcuenca. En la Figura 16, se presentan los promedios de las concentraciones de nutrientes NO₃, NH₄ y PT (ug/L) perteneciente al año 2019 y en función de los porcentajes de las respectivas CS de las subcuencas, partiendo de las relaciones significativas de la tabla 5. Estos porcentajes de CS corresponden al mapa de octubre de 2019 por ser el más reciente y el que menos errores posee de clasificación. Estos resultados se exponen con fines exploratorios y se tiene que considerar con precaución ya que los datos de nutrientes y coberturas son limitados. Primero, hubo una relación positiva entre el área de cultivo en la subcuenca y la concentración de PT. Esta relación se mantuvo por las bajas concentraciones de PT (< 40 ug/L) en cuencas de < 5% de cultivo y concentraciones relativamente altas (≥ 75 ug/L) en subcuencas con área de cultivo > 8% (**Fig. 16**).

Segundo, hubo un aumento de NO₃ con mayor área de pastizal natural/seminatural y una declinación de NO₃ con mayor superficie de eucalipto. Las subcuencas con menores valores de NO₃ tuvieron registro de mayores áreas de forestación (12-25%)) y menores áreas de pastizal natural/seminatural (20-40%) (**Fig. 16**). Sin embargo, es importante mencionar que los valores bajos de NO₃ que se registraron en las subcuencas NAC y GGR fueron la excepción y la mayoría de los valores de NO₃ fueron altos, tanto en los Arroyos Buricayupí y Arroyo Santana como también en los Ríos Queguay Grande y Queguay Chico (**Fig. 16**). No se registraron relaciones significativas respecto al NH₄ con cobertura en cualquiera de las cuatro clases, cultivo, pastizal natural/seminatural, forestación (*Eucaliptus*) y suelo desnudo (Tabla 5). Sin embargo, destacamos que la mayoría de los valores fueron menor a 30 ug/L, con la excepción de un registro de > 75 ug/L en el Queguay Chico en agosto de 2019 (**Fig. 15**).

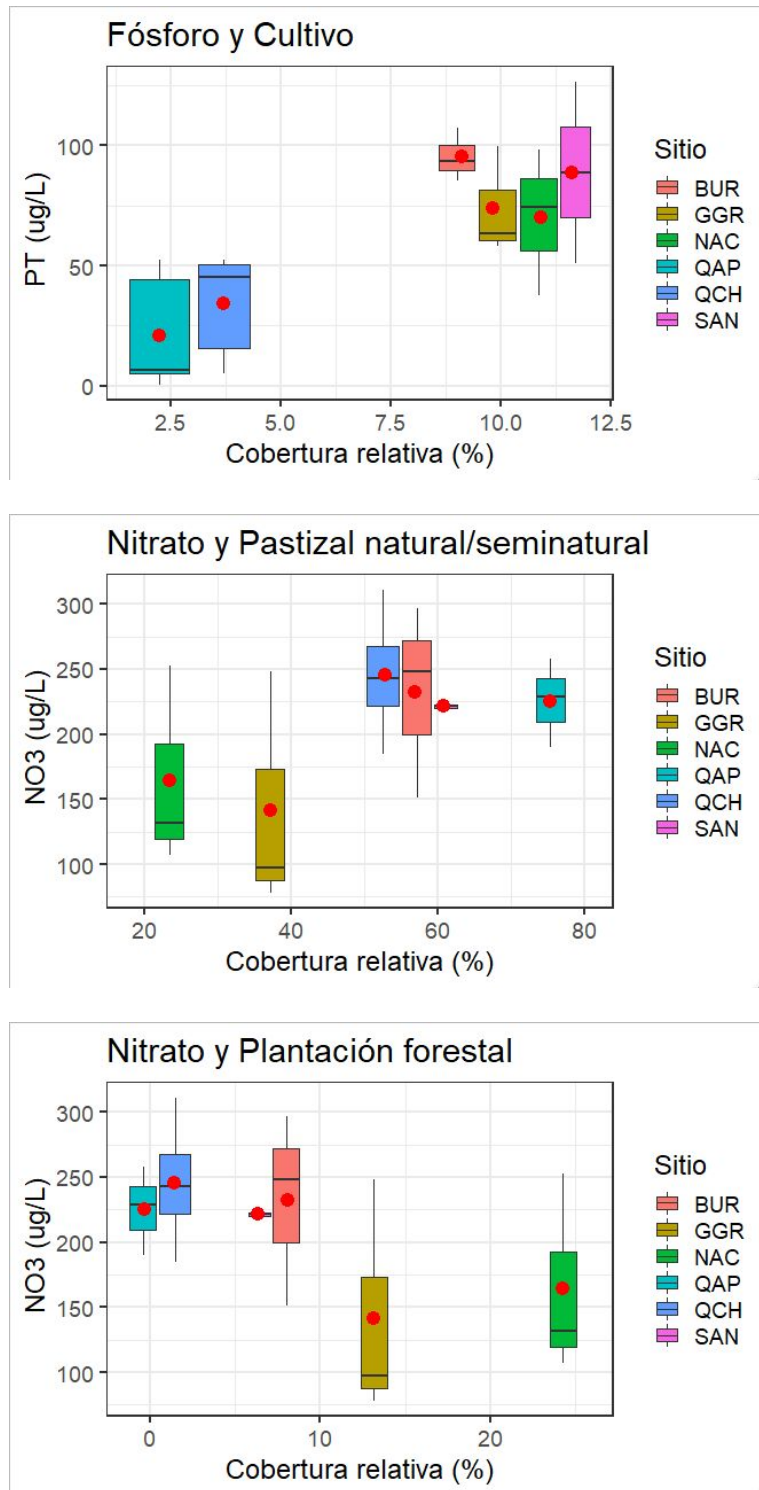


Figura 16. Puntos rojos: Promedio de las concentraciones de nutrientes NO₃, NH₄ y PT (ug/L) (año 2019), en función de los porcentajes de las respectivas CS de las subcuencas (octubre 2019) basados en las relaciones significativas de la Tabla 5.

En la Figura 17, mediante el Coeficiente de Correlación de Pearson (R), se reflejan y respaldan la misma relación evidenciada entre las variables estudiadas y los valores F y p del modelo de regresión lineal (Tabla 5). No se pudo separar el impacto de cada cobertura de suelo sobre las propiedades del agua, sino comparar las diferencias entre subcuencas con combinaciones distintas CS.



Figura 17. Matriz de correlación de Pearson. Las correlaciones positivas se muestran en color azul y las negativas en rojo. La intensidad del color y el tamaño del círculo son proporcionales a los coeficientes de correlación (números de color negro). C (cultivo), E (eucalipto), P (pastizal natural/seminatural), SD (suelo desnudo), NO3 (nitrato), NH4 (amonio), PT (fósforo total).

Discusión

Las coberturas de suelo y sus tendencias en el corto y largo plazo son un componente clave para entender el impacto de actividades en la cuenca hidrográfica sobre la calidad de los sistemas acuáticos. En esta tesis se investigó la metodología de clasificación supervisada en aras de evaluar su viabilidad para generar clasificaciones actualizadas, rápidas y precisas que ayuden al monitoreo sobre las cuencas pertenecientes al Área Protegida “Montes del Queguay”. En base a la clasificación final de los seis mapas entre 2018 y 2019, se relacionaron los niveles de temperatura, oxígeno, turbidez y nutrientes del agua con las nuevas clasificaciones de CS producidas en este trabajo. Se destacó el aumento en PT con un aumento de área de cultivo en la cuenca, un aumento en NO₃ con un aumento de área de pastizal natural/seminatural y disminución de este mismo nutriente con mayor cobertura de plantaciones forestales.

4.1 Clasificación de la cobertura del suelo.

Entre las composiciones en falso color e índices ejecutados durante esta investigación, la utilización de la combinación de bandas 11-8-2 fue las más adecuadas por su elevado contraste y capacidad de diferenciación entre coberturas (principalmente agrícola y suelo desnudo) y acorde a las dimensiones y alcance de esta tesis. Entre los seis juegos de bandas que se evaluaron, esta composición se destacó por el empleo de la banda N°11 correspondiente al dominio espectral SWIR (infrarrojo de onda corta). Esta banda tiene múltiples aplicaciones en geología, respuesta ante incendios, identificación de materiales artificiales y para los fines de este trabajo, en la evaluación del estrés por humedad del suelo y del dosel como un indicador de sanidad; por lo que puede ser usado en la observación de los tipos y condiciones del suelo y vegetales antes, durante y después de una temporada de cultivo (**Digital Globe, 2015; ESA Sentinel Online, 2019b**). Publicaciones científicas anteriores como **Piedelobo et al.,**

2018 y **Zhang et al., 2017** han mencionado además la combinación 11-8-4 con aplicaciones para diferenciar cubiertas agrícolas y cuyo resultado visual es similar al falso color 11-8-2 de este trabajo; aun así, se optó por la elección de esta última composición siguiendo la documentación oficial de Sentinel Hub (**Sinergise, 2019**).

Zhang et al., 2017 afirma acorde a sus resultados de clasificación supervisada, que la utilización de la combinación 11-8-4 es más efectiva en comparación a la utilización de índices NDWI y NDVI. Por otro lado, **Zhang et al., 2017** también destaca que al utilizar combinaciones de solo tres bandas se pierde información y al emplear un compuesto con muchas más que esta cantidad (Sentinel tiene 13 bandas) aumenta la precisión de la clasificación. Ello implica, que en el trabajo de esta tesis se perdió información valiosa que hubiera podido ser empleada para lograr resultados más precisos.

Respecto a la selección de imágenes para el mapeo de CS, existe una variedad de productos con diferentes resoluciones espaciales y temporales. Si bien la cobertura a nivel nacional se encuentra analizada bajo el satélite Landsat 8, en esta tesis se siguió el ejemplo de trabajar con imágenes Sentinel al igual que en trabajos previos de cobertura sobre bosques nativos. Este es un satélite con mayor resolución espacial y mayor número de bandas por lo cual brinda una mayor definición de las CS a escala regional.

En cuanto al tipo de clasificaciones a emplear, gran parte de las opiniones afirma que la clasificación supervisada funciona mejor que la no supervisada (generación de firmas espectrales automáticamente sin intervención del usuario) (**Alrababah & Alhamad, 2006**), por el contrario, **Rosentein & Karnieli, 2011** sugieren que las áreas de entrenamiento no son suficientes para acaparar la amplia variación espectral de las coberturas.

Luego de múltiples pruebas con distintos complementos (entre ellos SCP y SAGA), los algoritmos de GRASS resultaron ser los más eficientes en tiempo y estabilidad en la clasificación supervisada, ya que las otras herramientas tenían tiempos prolongados con errores frecuentes durante el procesamiento o eran incapaces de procesar la elevada extensión del área.

Durante el transcurso de la clasificación y sus resultados se presenciaron diversos problemas al momento de realizar ediciones o manipulaciones con elevado costo de tiempo. Se realizaron diversas pruebas con capturas de distintos tamaños de imagen y se llegó a la conclusión probable de que esto fue debido a que la inmensa extensión de las capturas satelitales con las que se trabajó, se encontraban al límite de lo que el software y/o el equipo podían soportar, por lo que se aconseja integrar el lenguaje de programación R a la plataforma QGIS como solución. Si bien R tiene sus limitaciones con respecto al manejo de los software de Sistemas de Información Geográfica (SIG), este podría ayudar a hacer más eficiente el manejo y visualización de datos, debido a que R es el lenguaje estadístico sobresaliente e indiscutible en su campo, que se destaca por sus métodos avanzados de estadística, análisis de datos, amplio conjunto de geoalgoritmos, poder de geoprocésamiento y desarrollo del código actual; en otras palabras, la interfaz R con SIG combina lo mejor de ambas partes para la geocomputación estadística automatizada **(Muenchow et al., 2017)**.

4.2 Calidad de agua.

Una caracterización del estado de los cursos de agua del Litoral Norte es fundamental para el control del estado ambiental y sanitario de la Reserva Natural y las zonas aledañas. La evaluación espacio-temporal de los seis parámetros fisicoquímicos de calidad de agua de las subcuencas del Queguay, deja uno de los pocos registros de calidad de agua de esta cuenca.

Si tomamos como referencia el Decreto N° 253/979 perteneciente al Código Nacional de Aguas utilizado en la adjudicación de las cuatro clases de aguas, las variables de NO₃ y NH₄ se encontraron dentro de los valores aceptables para cursos de todas las clases. Por otro lado, el fósforo total fue la excepción por no cumplir con la normativa con concentraciones promedios por subcuenca que estaban entre los 25.5 y 95.4 ug/L. Este rango de valores está por encima de los 25 ug/L permitido por la legislación, ya sea en lo referente a aguas destinadas al abastecimiento de las poblaciones con tratamiento convencional, riego de cultivos destinados al consumo humano en su forma

natural o no natural, recreación por contacto directo con el cuerpo humano o preservación general de la flora y fauna hídrica.

Dado los altos valores de fósforo encontrados en el Río Uruguay, actualmente se encuentra bajo evaluación el valor mínimo de fósforo total establecido por el decreto del año 1979 (**Comité Científico CARU, 2019**). En este periodo había relativamente pocos datos de los cursos de agua en Uruguay, y por ende relativamente poca información de base sobre la variabilidad espacio-temporal de las características de nuestras aguas. Diferentes países utilizan diferentes estándares medioambientales, no solo por la geología o la biota de un lugar, sino la historia productiva (agrícola-ganadera para el caso uruguayo) de varias décadas de explotación que han impactado sobre la calidad del agua.

Históricamente, el principal rubro de explotación en Uruguay ha sido el ganadero, sin embargo el auge del desarrollo agrícola ha desplazado a la ganadería como principal generador de ingreso económico (**Alonso et al., 2019**). Según la Dirección de Estadísticas Agropecuarias (**MGAP-DIEA, 2015**), la superficie de cultivos de secano se multiplicó más de cuatro veces entre los años 2000-2015. Durante el mismo período la silvicultura aumentó incluso más territorio por más de 30 veces (**Alonso et al., 2019**). Estos cambios no se encuentran aislados ya que también han dado lugar a una triplicación en la importación de fertilizantes (nitrógeno y fósforo), mientras que la cantidad de plaguicidas aumentó en un 20% (**Alonso et al., 2019**). Por ende, es de vital importancia más estudios sobre los potenciales impactos de actividades agrícola ganaderas en los cursos de agua del interior del país, como el Río Queguay.

Como referencia de un caso nacional, se compararon los valores promedios de nutrientes de esta tesis con otro estudio en cuencas de uso agrícola-ganadera en el interior de Uruguay; **Arocena et al., 2018** ejecutaron su investigación en distintos arroyos pertenecientes a ecorregiones diferenciadas en la cuenca del Río Negro. En ambos trabajos los rangos de valores para NO₃ y NH₄ fueron similares y adecuados según la norma, pero para el caso de PT nuevamente se evidenció que los valores superaron los límites reglamentados por ley. Dicho esto, sería prudente tomar

precaución respecto hacia donde apunta la calidad de agua del Queguay y de otras zonas de nuestro país en el futuro. La razón de ello yace en que la carga de nutrientes, por ejemplo, es la causante del deterioro del agua por eutrofización y consiguiente aumento en la probabilidad de florecimientos de cianobacterias tóxicas (**Chalar et al., 2015**). Es imprescindible tomar medidas respecto al control de las actividades agrícolas, ganaderas y forestales, disminución en el uso de fertilizantes, control de la erosión de los suelos, protección, recuperación y restauración de zonas naturales de amortiguación (**Chalar et al., 2015**).

4.3 Relación entre cobertura de suelo y nutrientes en el agua.

Existe una importante conexión entre la CS y la calidad de los sistemas acuáticos a nivel de subcuencas; los cambios en la tierra pueden tener varios impactos en términos de parámetros fisicoquímicos y biológicos en la calidad del agua al ejercer presiones y desafíos sobre dichos ecosistemas (**du Plessis et al., 2014; Kibena et al., 2014; Teixeira et al., 2014**). Entre estos, el problema más común que surge son el transporte de sedimentos hacia los cursos de agua, asociado a los procesos de erosión y lixiviación (**Fulton & West, 2002**). Las actividades de deforestación y cosechado implican alteraciones del terreno que exponen la tierra y por tanto los sedimentos al desplazamiento descendente por viento y lluvia hacia los cauces hídricos (**Fulton & West, 2002**). Los resultados de este trabajo sugieren menor concentración de NO₃ con mayores extensiones de plantaciones forestales (principalmente de *Eucalyptus*, con presencia de otras especies como *Pinus*) y mayores valores de NO₃ con mayor área de pastizal natural/seminatural. Por su parte, el NH₄ generalmente no representa un problema para los sistemas fluviales debido a su rápida absorción y rápida conversión a NO₃ (**Fulton & West, 2002**). La variabilidad espacial en NH₄ respecto a todas las CS marcó prácticamente estabilidad, con un pulso importante en QCH para profundizar. Respecto a las concentraciones de fósforo, el PT aumentó con mayores coberturas de cultivo, mientras que con mayores extensiones de pastizal natural/seminatural, los niveles de PT fueron relativamente bajos (mayormente < 50 ug/L). .

El problema que sustenta esta afirmación y las anteriores respecto a la relación entre los nutrientes y coberturas basadas, yace en que la cobertura de suelo tiene profundos errores al asignar zonas de suelo desnudo en donde existen otras coberturas como consecuencia de aparentes periodos con déficit hídrico que alteran la validez de la investigación.

Respecto a otros estudios sobre la relación entre cobertura de suelo y la calidad del agua, también se registraron aumentos de fósforo con mayor cobertura de cultivos (**Mello et al., 2018; Sharpley, 2016; Sharpley et al., 2001; Uriarte et al., 2011**). En respuesta a la observación de la carga de fósforo en los ecosistemas de agua dulce, como pauta de gestión, **Sharpley, 2016** recomienda la adopción de la estrategia “4R” (traducido del inglés: correcta proporción, correcto tiempo, correcta fuente y correcta colocación de fósforo) para un manejo más responsable de los fertilizantes y disminuir la escorrentía de los mismos.

En el caso de esta investigación, otra razón por la cual es difícil determinar si los cambios en NO₃, NH₄ o PT tienen una relación causa-efecto ante determinadas coberturas, es debido a que indiferentemente de las medidas ambientales que se ejecuten, el fósforo puede continuar su liberación a partir de sedimentos por acumulaciones previas con hasta 20 años de antigüedad (**Sharpley, 2016**). También es pertinente tener en cuenta que la erosionabilidad y, por ende, el flujo de nutrientes en la escorrentía depende mucho de factores como textura, densidad y tipo de suelo, concentración de materia orgánica, tasa de infiltración, clima y composición de especies (**Fulton & West, 2002**). En particular, la zona Montes del Queguay es una vasta planicie que se encuentra expuesta a inundaciones irregulares en las cuales no se pueden realizar muestreos de agua en determinados periodos dado a la impredecible fluctuación de las concentraciones de nutrientes en el agua por la escorrentía y lavado del terreno subyacente.

Este estudio es una primera caracterización de las aguas y las CS de las principales cuencas hidrológicas que alimentan al área protegida; es una primera aproximación a la dinámica espacio-temporal de estos cursos de agua, a fines de establecer una base

de conocimiento para en un futuro evaluar potenciales impactos de actividades específicas en la cuenca.

4.4 Conclusiones.

El principal objetivo de esta investigación fue desarrollar capas actualizadas de CS y evaluar su relación con la variabilidad en los parámetros fisicoquímicos en los cursos de agua que confluyen en la Reserva Montes del Queguay en el Litoral Norte de Uruguay. A partir de los resultados, se destaca el empleo de distintas combinaciones de bandas en base de imágenes S2 para clasificar las CS en una zona de alto interés ecológico y socioeconómico en el interior del país. El mapeo de las CS es uno de los componentes claves en la evaluación de amenazas sobre los ecosistemas acuáticos de agua dulce, tanto en cuencas con usos agrícolas como también en áreas protegidas destinadas a conservar la biodiversidad y servicios ecosistémicos de los ecosistemas fluviales. También se destaca como resultado una base de información sobre la variabilidad espacio-temporal en calidad de agua de los cursos que alimentan el área protegida, y su potencial relación con coberturas de cultivo, pastizal natural/seminatural y plantación forestal a nivel de subcuenca. Según los resultados, se plantea que las actividades agrícolas ubicadas en las subcuencas circundantes pueden contribuir al aumento en los niveles de PT de los cursos fluviales de la zona, los cuales sobrepasan los niveles permitidos a escala nacional para aguas destinadas al riego y recreación. Sin embargo, los resultados sobre la relación entre cobertura de suelo y las concentraciones de nutrientes son incompletas y merece revisión dado los errores provenientes de la clase "suelo desnudo" en la capa de cobertura de suelo. Para obtener mejores datos y más específicos acerca de la relación entre las CS y los parámetros que determinan la calidad del agua, se sugiere aumentar la frecuencia de muestreo de calidad de agua, realizarlos sobre un menor número de cuencas o simplemente sobre zonas de menor extensión con coberturas específicas para obtener datos más concretos, una evaluación del terreno por verificación en persona más

exhaustiva, corregir las clasificaciones de las coberturas de suelo manualmente y mejorar su modelado y representación.

Bibliografía

Achkar, M., Bessonart, M., Freitas, G., Mello, A. (2007) **Inclusión de los Montes del Queguay, Departamento de Paysandú, en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas**. Informe técnico. Tecnicatura en Gestión de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable, Facultad de Ciencias, Udelar. 77p.

Allan D., Castillo M. (2007). **Stream Ecology, structure and function of running waters**. Springer, Dordrecht (The Netherlands) 2nd ed.

Alonso J., Arocena R., Bonilla S., Quintana F. (2019) **Chapter: Water Quality in Uruguay, current status and challenges**. Water Quality in the Americas Risks and Opportunities, 626pp. InterAmerican Network of Academies of Sciences. Mexico.

Alrababah, M.A., & Alhamad, M.N. (2006). **Land use/cover classification of arid and semi-arid Mediterranean landscapes using Landsat ETM**. International Journal of Remote Sensing, 27, 2703.

Arocena R., Chalar G., González I., García G., Piccardo A., Piccini C., Vernassa T., Sandes P., Castro M. (2018) **Evaluación ecológica de cursos de agua y biomonitorio cuenca del Río Negro**. Producto 5: informe final. Universidad de la Republica (Facultad de Ciencias), Sección Limnología. 200pp.

Aubriot L., Conde D., Bonilla S., Hein V., Britos, A. (2005). **Vulnerabilidad de una laguna costera en una reserva de biosfera: indicios recientes de eutrofización**. En: Vila, I. y J. Pizarro (eds.). Taller internacional de eutrofización de lagos y embalses. Montevideo: CYTED XVIIIB. 65-85pp.

Aubriot L., Delbene L., Haakonsson S., Somma A., Hirsch F., Bonilla S. (2017) **Evolución de la eutrofización en el Río Santa Lucía: influencia de la intensificación productiva y perspectivas**. Revista del Laboratorio Tecnológico del Uruguay, INNOTECH No.14, 7-16pp.

Baeza, Santiago. 2020. Comunicación Personal: Comentarios en la tesis de grado sobre metodología de clasificación de uso de suelo. julio 2020.

Bo-Cai Gao (1996) **NDWI, a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space**. Remote Sensing of Environment, 58(3): 257-266pp.

Bonilla, S., Haakonsson, S., Somma, A., Gravier, A., et al., (2015) **Cianobacterias y cianotoxinas en ecosistemas límnicos de Uruguay**, INNOTECH No. 10, 9-22pp.

Brazeiro, A., ed. (2015) **Eco-regiones de Uruguay: biodiversidad, presiones y conservación**. Vol 1. Montevideo: Facultad de Ciencias.

Céspedes-Payret C., Piñeiro G., Achkar M., Gutierrez O., Panario D. (2009). **The irruption of new agro-industrial technology in Uruguay and their environmental impacts on soil, water supply and biodiversity: a review**. International Journal of Environment and Health 3(2):175-197pp.

Chalar G., Fabián D., González-Piana M., Piccardo A. (2015) **Informe interanual, estado y evolución de la calidad de agua de los tres embalses del Río Negro, período 2011-2015**. Sección Limnología Facultad de Ciencias y Dpto. de Ecología, Instituto de Ciencias Ambientales, Udelar. Montevideo, Uruguay.

Clements W., Carlisle D., Lazorchak J., Johnson P. (2000). **Heavy metals structure benthic communities in Colorado mountain streams**. Ecological Applications, 10: 626-638pp.

Colorado State University (2018) **Geospatial Training and Applications for Ethiopia**. Disponible desde:
<https://ethiopia-gis.nrel.colostate.edu/pdf/RSLessons/RS_Lesson_2_Image_Interpretation.pdf> [Acceso 11/2019]

Comité Científico CARU (2019) **Plan de Monitoreo Integral del Río Uruguay para todo el tramo compartido. Subprograma 1. Monitoreo de la calidad de agua, sedimento y biota en el Río Uruguay**. Informe primeros seis meses de monitoreo. Comisión Administradora del Río Uruguay. 240pp.

Conde D., Arocena R., Rodríguez-Gallego, L. (2002). **Recursos acuáticos superficiales de Uruguay: ambientes algunas problemáticas y desafíos para la gestión (I y II)**. En: AMBIOS, 3(10), pp. 5-9 y 4(11), 32-33pp.

Conde D., Sommaruga R. (1999). **A review of the state of Limnology in Uruguay**. En: Gopal, J. y Wetzel, R (eds.). Limnology in developing countries 2. Nueva Delhi: International Scientific Publications/SIL. 1-31pp.

Crossa, M. & Lucas C. (2017) **Informe técnico, monitoreo de calidad de agua en la Cuenca del Río Queguay**. Polo de Ecología Fluvial Departamento del Agua CENUR Litoral Norte UdelaR.

Daily, G. (1997) **Nature's Services: Societal dependence on natural ecosystems**. Island Press, Washington DC. 392pp.

Digital Globe (Maxar Company) (2015) **Benefits of SWIR**. Disponible desde:
<https://dgv4-cms-production.s3.amazonaws.com/uploads/document/file/164/DG_SWIR_WP.pdf> [Acceso 11/2019]

Dirección de Estadísticas Agropecuarias (MGAPDIEA) (2015). **Anuario estadístico agropecuario. Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca**. Montevideo. Retrieved from: <http://www2.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,diea,diea-anuario-2015,O,es,0>.

du Plessis, A., Harmse, T., Ahmed, F., (2014) **Quantifying and predicting the water quality associated with land cover change: a case study of the Blesbok Spruit Catchment, South Africa**. Water 6 (10): 2946-2968pp.

ESA, Earth online (2019) **Sentinel-2**. Disponible desde:
<<https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/sentinel-2>> [Acceso 10/2019]

ESA, Sentinel online (2019a) **Resolution and Swath**. Disponible desde:
<<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrument-payload/resolution-and-swath>>. [Acceso 10/2019]

ESA, Sentinel online (2019b) **Radiometric Resolutions**. Disponible desde:
<<https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/radiometric>> [Acceso 11/2019]

ESA, Sentinel online (2019c) **Level-2A Algorithm Overview**. Disponible desde:
<<https://earth.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-2a/algorithm>> [Acceso 11/2019]

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), (2016). **FAOSTAT. Database**. Disponible desde:
<<http://faostat3.fao.org/browse/R/RP/E>> [Acceso 08/2019]

Fulton S. & West B. (2002) **AQUA3: Forestry Impacts on Water Quality**. Southern Forest Resource Assessment Draft Report, US Environmental Protection Agency, 34pp.

García Préchac F., Ernst O., Arbeletche P., Bidegain MP., Pritsch C., Ferenczi A., Rivas M. (2010). **Intensificación agrícola: Oportunidades y Amenazas para un país productivo y natural**. CSIC, Montevideo. 128p.

Galizia J., Matsumura T. (2011) **Limnology**. CRC Press Taylor & Francis Group, Florida (Unites States)

Gallego, A., Pradana J. (2019) **Criterios de calidad y gestión del agua potable**. 1ª. ed. UNED.

Gholizadeh M., Melesse A., Reddi L., (2016). **A Comprehensive Review on Water Quality Parameters Estimation Using Remote Sensing Techniques**. Sensors, 16: 1298-1341pp.

González F.E., Ruiz J.M., Acosta F.M. (2013) **Tutorial de teledetección espacial Telecan**. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. España.

Grass development team (2019) **GRASS GIS 7.8.2dev Reference Manual**. Disponible desde: <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/index.html> [Acceso 12/2019]

Guo H., Goodchild M., Annoni A., (2020) **Maual of Digital Earth**. Springer, Singapore.

Horning N., Robinson J., Sterling E., Turner W., Spector S., (2010). **Techniques in Ecology & Conservation**. 1-467pp. Oxford University Press, UK.

INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria) (2019) **Banco datos agroclimático**. Disponible desde: <http://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico> [Acceso 12/2019]

Jones D.A., Hansen A.J., Bly K., Doherty K., Verschuyt J.P., Paugh J.I., Carle R., Story S.J., (2009) **Monitoring land use and cover around parks: a conceptual approach**. Remote Sens. Environ. 113: 1346-1356pp.

Kibena, J., Nhapi, I., Gumindoga, W., (2014) **Assessing the relationship between water quality parameters and changes in land use patterns in the Upper Manyame River, Zimbabwe**. Phys. Chem. Earth Parts A/B/C 67-69pp, 153-163pp.

Litvosky, M. & Urruty, C. (Eds) 2012. Aportes para plan de Manejo del Área protegida. Montes del Queguay. Contribuciones de los usuarios locales del Río Queguay. Disponible desde: https://issuu.com/paysanducom/docs/memorias_del_queguay [Acceso 08/2019]

Martin R., (2008). **Satellite remote sensing of surface air quality**. Atmospheric Environment 42: 7823-7843pp.

Mello K., Valente R., O.Rand T., Alves dos Santos A., Vettorazzi C. (2018). **Effects of land use and land cover on water quality of low-order streams in Southeastern Brazil: Watershed versus riparian zone**. Catena, 167: 130-138pp.

Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial (MVOTMA) (2007) **Plan Nacional de Aguas**. 1ª. ed. Montevideo, Uruguay.

Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial (MVOTMA) (2012) **Proyecto de Selección y Delimitación del área Montes del Queguay al Sistema Nacional de Áreas Protegidas**. Disponible desde: https://www.mvotma.gub.uy/component/k2/item/download/9267_301b330f209d36903b97e99024ca9cb5 [Acceso 08/2019]

Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial (MVOTMA) (2019) **Geoservicios**. Disponible desde: <https://www.dinama.gub.uy/geoservicios/> [Acceso 10/2019]

Muenchow J., Schratz P., Brenning A. (2017) **RQGIS: Integrating R with QGIS for Statistical Geocomputing**. The R Journal Vol. 9/2: 409-428pp.

Nagendra H., Lucas R., Pradinho Honrado J., Jongman R., Tarantino C., Adamo M., Mairota P., (2012) **Remote sensing for conservation monitoring: Assessing protected areas, habitat extent, habitat condition, species diversity, and threats**. Ecol. Indic.: 1325-1340 pp.

Newton A. (2007) **Forest Ecology and Conservation, A Handbook of Techniques**. Oxford University Press, New York (Unites States)

Paul M., Meyer L. (2001) **Streams in the urban landscape**. Annual Review of Ecology and Systematics, 32: 333-365pp.

Pettorelli, N. (2013). **The Normalized Difference Vegetation Index**. Oxford University Press, Oxford, UK.

Pettorelli N., Safi K., Turner W., (2014) **Satellite remote sensing, biodiversity research and conservation of the future**. Phil. Trans. R. Soc. 369, 20130190. doi:10.1098/rstb.2013.0190

Pettorelli, N., Schulte to Bühne, H., Shapiro, A. C., & Glover-Kapfer, P. (2018) **Satellite Remote Sensing for Conservation**. WWF Conservation Technology Series 1(4). United Kingdom.

Piedelobo L., Ortega-Terol D, Del Pozo S., 1, Hernández D., Ballesteros R., Moreno M., Molina J., González D. (2018). **HidroMap: A New Tool for Irrigation Monitoring and Management Using Free Satellite Imagery**. ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2018, 7, 220pp

Poursanidis D., Chrysoulakis N. (2017) **Remote Sensing, natural hazards and the contribution of ESA Sentinels missions**. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 6: 25-38pp.

Quirós R., Luchini L. (1982). **Características limnológicas del embalse Salto Grande**. III. Fitoplancton y su relación con parámetros ambientales. En: Revista Asociación Ciencias Naturales del Litoral, 13: 40-66pp.

R Development Core Team (2020) **R, language and environment for statistical computing and graphics**. Versión: 3.6.2 (Dark and Stormy Night). Disponible desde: <https://www.r-project.org> [Acceso 02/2020]

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å. et al. (2009) **Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity**. Ecology and Society, 14(2): 32pp.

Roldán, G. & Ramírez, J. (2008) **Fundamentos de limnología neotropical**. 2ª ed. Medellín, Colombia.

Rozenstein O. & Karnieli A. (2011) **Comparison of methods for land-use classification incorporating remote sensing and GIS inputs**. Applied Geography 31: 533-544pp.

Sagasta, J., Marjani S., Turrall H., Burke J. (2017) **Water pollution from agriculture: a global review**. Disponible desde: <http://www.fao.org/3/a-i7754e.pdf> [Acceso 08/2019]

Sharpley A., McDowell R., Kleinman P. (2001) **Phosphorus loss from land to water: integrating agricultural and environmental management**. Plant and Soil 237: 287-307pp.

Sharpley A. (2016) **Managing agricultural phosphorus to minimize water quality impacts**. Scientia Agricola, 73(1): 1-8pp.

Sinergise, Laboratory for geographical information systems, Ltd. (2019) **Sentinel 2 EO products**. Disponible desde: https://www.sentinel-hub.com/develop/documentation/eo_products/Sentinel2EOproducts [Acceso 10/2019]

Sistema Nacional ambiental (2018) **Plan Ambiental Nacional para el Desarrollo Sostenible**. Disponible desde: <https://www.mvotma.gub.uy/planambiental> [Acceso 08/2019]

Souza Jr, C.M., Siqueira, J.V., Sales, M.H., Fonseca, A.V., Ribeiro, J.G., Numata, I., Cochrane, M.A., Barber, C.P., Roberts, D.A. and Barlow, J., (2013) **Ten-year Landsat classification of deforestation and forest degradation in the Brazilian Amazon**. Remote Sensing, 5(11), pp.5493-5513.

Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., Mauricio Rosales M., De Haan, C. (2006) **Livestock's Long Shadow: Environmental Issues and Options**. Rome, Italy.

Teixeira, Z., Teixeira, H., Marques, J.C. (2014) **Systematic processes of land use/land cover change to identify relevant driving forces: implications on water quality**. Sci. Total Environ. (470-471): 1320-1335pp.

Turner W., Spector S., Gardiner N., Fladeland M., Sterling E., Steininger M., (2003) **Remote sensing for biodiversity science and conservation**. Trends Ecol. Evol. 18: 306-314 pp.

United Nations (2016) **Report of the Inter-Agency and Expert Group on Sustainable Development Goal Indicators**. 47th Session of the United Nations Statistical Commission. New York, USA.

Uriarte M., Yackulic C., Lim Y., Arce-Nazario J. (2011) **Influence of land use on water quality in a tropical landscape: a multi-scale analysis**. Landscape Ecol 26:1151-1164pp.

Vallentyne, J. (1972). **Freshwater supplies and pollution: Effects of the demographic explosion on water and man.** In N. Polunin, ed. *The Environmental Future*. Macmillan Press Ltd., London (United Kingdom), 181-211pp.

Vallentyne, J. (1988). **First direction, then velocity.** *Ambio* 17:409p.

Wetzel R. (2001) **Limnology Lake and River Ecosystems.** Academic Press Elsevier, San Diego, California (United States) 3rd Ed.

Zhang T., Su J., Liu C., Chen WH. (2017). **Band Selection in Sentinel-2 Satellite for Agriculture Applications.** Proceedings of the 23rd International Conference on Automation & Computing, University of Huddersfield, Huddersfield, United Kingdom.