

Tesis de Grado
Licenciatura en Geografía
Opción Ambiental

**Evaluación de la variación espacio temporal de la
producción de biomasa en humedales mediante el uso de
sensores remotos
Santa Teresa – Rocha-Uruguay**



Carolina Faccio
Licenciatura en Geografía
Julio de 2010

Docente Orientador: Dr. Marcel Achkar

Tribunal
Prof. Daniel Panario
Msc. Fernando Pesce
Dr. Marcel Achkar

Laboratorio de Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental del Territorio
Departamento de Geografía
IECA

Facultad de Ciencias
Universidad de la República

ÍNDICE

Resumen	4
1. Introducción	5
1.1 Humedales	5
1.1.1 Ecosistemas del Uruguay y los humedales	5
1.1.2 Definición de humedal	6
1.1.3 Funciones y valores de los humedales	8
1.1.4 Funcionamiento de los humedales	10
1.1.5 Clasificación de los humedales	11
1.1.6 Humedales: un enfoque histórico	13
1.1.7 Degradación y pérdida de los humedales en el mundo	17
1.1.8 Situación actual de los humedales en el Uruguay	19
1.2 Las técnicas de teledetección y la evaluación de los humedales	22
1.2.1 Sensores	22
1.2.1.1 Satélite Landsat 5 TM	22
1.2.1.2 Satélite SPOT VGT	23
1.2.2 Índice Verde	24
1.3 Objetivos e hipótesis	28
1.3.1 Objetivo general	28
1.3.2 Objetivos específicos	28
1.3.3 Hipótesis	28
1.4 Área de estudio	29
1.4.1 Cuenca de la Laguna Negra	29
1.4.2 Humedales del Noreste de la Laguna Negra	33
2. Metodología	36
2.1 Delimitación del área	37
2.2 Zonificación del humedal.	38
2.2.1 Zonificación de los humedales a escala de detalle	38
2.2.2 Zonificación según resolución temporal	38
2.2.2.1 Preparación de los datos SPOT	38
2.2.2.2 Zonificación	40

2.2.2.3 Estudio estadístico de los resultados obtenidos a partir del ACP	41
2.4 Análisis del Comportamiento temporal del NDVI	41
3. Resultados	42
3.1 Delimitación del área	42
3.2 Zonificación a escala de detalle.	44
3.3 Zonificación según resolución temporal	46
3.3.1 Preparación de los datos SPOT	46
3.3.2 Zonificación	47
3.3.3 Estudio estadístico de los resultados obtenidos a partir del ACP	50
3.3.3.1 Análisis estadístico de las diferencias entre las zona Este y Oeste	50
3.3.3.2 Análisis estadístico de las diferencias entre las subzonas del Este	52
3.3.3.2.1 Nueva zonificación de las subzonas Este	53
3.3.3.3 Análisis estadístico de las diferencias entre las subzonas del Oeste	55
3.4 Análisis del Comportamiento temporal del NDVI	59
3.4.1 Comportamiento temporal de las subzonas del Este	59
3.4.2 Comportamiento temporal de las subzonas del Oeste	61
3.4.3 Comportamiento temporal de las zonas Este y Oeste.	62
3.4.4 Evolución temporal del NDVI y las variables meteorológicas.	63
4. Discusión	67
5. Conclusiones	70
6. Agradecimientos	71
7. Bibliografía	72
Anexos	76

RESUMEN

La distribución geográfica y conservación de los humedales es uno de los temas más estudiados a nivel mundial. La pérdida de funciones y servicios del ecosistema en la mayoría de los países del mundo, llevó a que la comunidad científica se interese en los mismos, enfocando muchos de sus estudios en el funcionamiento de los humedales con fines de conservación. En este sentido, el objetivo del presente trabajo es analizar la variabilidad espacial y temporal al interior de un humedal en Uruguay, explorando la integración de técnicas de teledetección de alta y baja resolución, y alta y baja frecuencia temporal. Se utiliza como indicador la producción de biomasa, a través de un índice que relaciona las bandas roja e infrarroja de imágenes satelitales captadas por sensores a bordo de los satélites Landsat 5 y SPOT, denominado Índice Verde Normalizado o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), a través del cual se determinan las diferencias espaciales y temporales en la producción de biomasa. Se trabaja con una serie de 411 imágenes SPOT para un periodo de 11 años y 4 meses. A partir de un Análisis de Componentes Principales se zonifica el humedal. Se identifican un total de 7 subzonas que se encuentran divididas en dos grandes zonas, Este y Oeste, (3 subzonas dentro del Este y 4 dentro del Oeste). La zonificación obtenida es verificada estadísticamente. Posteriormente se realiza un análisis de correlación, para cada subzona y zonas del NDVI y las variables meteorológicas, temperatura y precipitación, para determinar si las mismas condicionan la producción de biomasa de la vegetación del humedal. Los resultados obtenidos muestran que la metodología utilizada responde adecuadamente a los intereses del trabajo. Dejan expuesta la existencia de distintas zonas dentro del humedal, cada una con un comportamiento temporal característico, que varía en el tiempo, y que no se explican exclusivamente por las variaciones de temperatura y precipitación.

Palabras Clave: humedales, variación de productividad, zonificación, SIG, teledetección.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Humedales

1.1.1 Ecosistemas del Uruguay y los humedales

Uruguay se localiza al sureste de América del Sur, limita al oeste con Argentina y al norte y este con Brasil. Su localización en la región subtropical, entre los 30 y 35° de latitud sur y las características topográficas crean las condiciones para el establecimiento de un clima templado y húmedo, correspondiente al grupo Cfa de la clasificación de Köppen (Dirección Nacional de Meteorología, 2010). Sus suelos son mayoritariamente profundos, de fertilidad natural media a alta, lo que relacionado al clima, favorece el crecimiento de una vegetación de praderas. En el contexto biogeográfico de América del Sur, Cabrera y Willink (1980) denominaron a este ecosistema como Distrito Uruguayense, el cual integra la Provincia Pampeana que es compartida con el sur de Brasil y las provincias de Entre Ríos y Santa Fé en Argentina (Cabrera y Willink, 1980).

Si bien dentro de esta provincia el ecosistema dominante corresponde a la pradera, existen otras formas asociadas cuyas existencias dependen de la interacción de las condiciones geomorfológicas, litológicas, climáticas y edafológicas, como elementos básicos. Estos ecosistemas de menor extensión son: chircales, montes nativos, que incluyen monte ribereño, serrano, parque y palmares, humedales, comunidades halófitas, vegetación de ambientes acuáticos y de arenales (IMM, 2000).

En el Uruguay, los ecosistemas de humedales suelen encontrarse asociados a las praderas vinculados a planicies de inundación de los ríos y arroyos, bordes de lagunas costeras, áreas deprimidas del territorio, deltas y estuarios (Evia y Gudynas, 2000). En cuanto a las regiones paisajísticas, si bien cada una presenta ecosistemas característicos, los humedales pueden presentarse asociados, siempre que se den las condiciones. Esto no es extraño ya que por definición, los humedales son áreas del territorio que permanecen periódicamente inundados (Williams, 1991). Para que se den estas condiciones debe existir una morfología de la superficie que impida el drenaje de las aguas, es decir, áreas planas o deprimidas, asociadas a un sustrato impermeable. Estas características se dan en una diversidad de ambientes, cuyas localizaciones y orígenes son muy variados, por lo que pueden encontrarse en distintas regiones climáticas y relacionadas a distintas geomorfologías. Generalmente los humedales no ocupan grandes superficies. En el caso de Uruguay los de mayor extensión se localizan en: la costa atlántica (asociados a las principales lagunas costeras), las planicies que rodean la Laguna Merín, las planicies asociadas al Río Uruguay, Santa Lucía y Río Negro incluyendo varios de sus cauces tributarios (Figura 1).

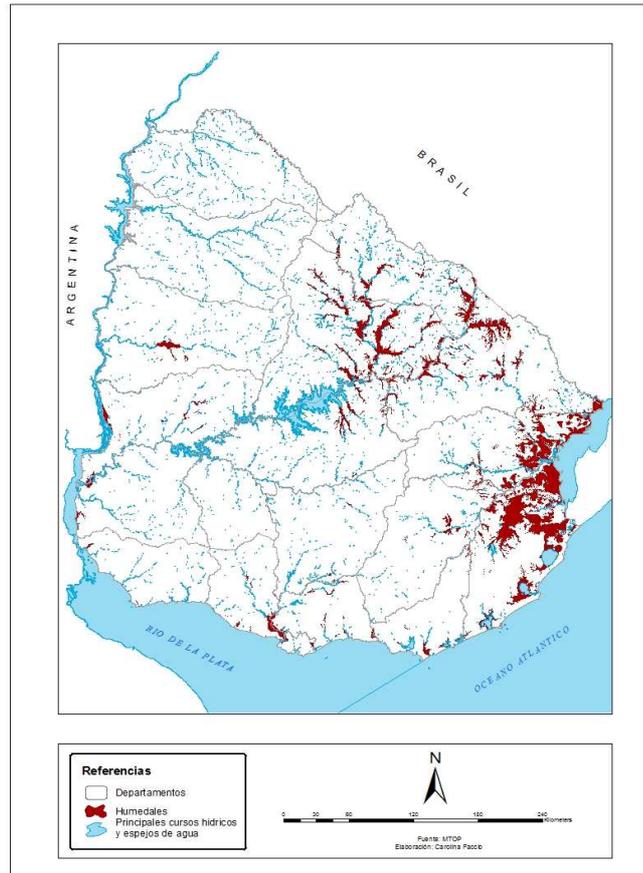


Figura 1. Humedales del Uruguay.

Según datos del MTOP los humedales en Uruguay ocupan una superficie total de 8051 km² (MTOP, 2004).

1.1.2 Definición de humedal

La convención Ramsar, trabaja con una definición que es mundialmente aceptada. Ésta refiere a los humedales como “extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros” (Ramsar, 2008b). Para el presente trabajo, ésta definición es considerada muy general, lo que es justificado por la adaptabilidad que debe presentar para incluir los diferentes territorios y tipos de humedales a nivel mundial. La generalización obliga a que únicamente haga referencia a aspectos hidrológicos, salinidad y tipo de génesis (natural-artificial), dejando de lado la biología, geomorfología y el concepto de ecosistema, lo que impide que sea considerada como un punto de inicio. En contrapartida, se tomará la siguiente definición que resulta de simplificar una serie de definiciones: *los humedales son considerados sistemas de*

transición entre ecosistemas acuáticos y terrestres (Mitsch y Gosselink, 2007; Williams, 1991), que permanecen inundados gran parte del año provocando la formación de suelos hidromórficos (Cowardin et al., 1979; citado en Berlanga y Ruiz, 2004; Williams, 1991), sobre los que crece una vegetación y se asocia una fauna adaptadas a las condiciones de exceso hídrico (Mitsch y Gosselink, 2007; Cowardin et al., 1979; citado en Berlanga y Ruiz, 2004).

El concepto de sistema nos permite pensar los humedales como un todo, resultante de la interacción de los subsistemas prioritarios: agua, suelo, material madre, vegetación, fauna, tiempo, relieve y energía solar, los cuales, mediante su interacción, alcanzan el equilibrio dinámico que resulta en la formación y mantenimiento del humedal. Por ser dinámico, el mismo sufre modificaciones que afectan a cada uno de los subsistemas que luego terminará en un todo modificado, que podrá o no diferir del original. Este, tal vez, sería el caso de los humedales que son drenados, donde el cambio en el régimen hídrico obliga a todo el ecosistema a evolucionar hacia un ecosistema distinto del anterior. También pueden suceder cambios en el régimen hídrico por un incremento en las precipitaciones, en tal caso, el humedal pasado un tiempo de drenaje y evaporación de las aguas, podría volver a su estado original.

Los humedales son considerados ecosistemas de transición, localizados entre las tierras altas, con suelos bien drenados y el agua, en los que crece una vegetación específica adaptada a suelos saturados de agua. La permanencia del agua, se debe básicamente a dos factores, la existencia de una napa freática cercana a la superficie o la presencia de una capa de agua que cubre la extensión producto de diversos factores (Ramsar, 2008b).

Los suelos también se encuentran afectados por el anegamiento; estos se forman y evolucionan en condiciones de saturación de agua, donde la porosidad del suelo se encuentra todo o gran parte del año colmada de agua. Esto motiva, que los procesos desarrollados se den en situaciones de carencia de oxígeno, siendo un claro ejemplo, la descomposición lenta e incompleta de la materia orgánica.

Si bien esta última definición es más precisa e involucra una serie de elementos de gran importancia, continúa siendo compleja e inexacta. A pesar de involucrar la interacción de los tres factores más condicionantes, hidrología, ambiente fisicoquímico y biota, son muchas las variaciones que llevan a tener dificultades al momento de definirlos y establecer límites precisos. Uno de los ejemplos más comunes, es la gran variabilidad en el período de permanencia de las inundaciones entre humedales. Otro es la localización, si bien existen áreas que habitualmente generan las condiciones para su formación, no son específicas ni se limitan a un clima en particular. Asimismo hay humedales de diversos tamaños, extensiones, localizaciones (interiores y costeros) y que presentan diferentes grados de modificación por actividades antrópicas.

Dada la variabilidad existente, queda en evidencia la complejidad que representa alcanzar una definición precisa que abarque la generalidad que representa el tema y que permita establecer una definición exacta de los límites de un humedal, justificando en cierta forma la inexactitud de las definiciones y el establecimiento en muchos casos de límites arbitrarios (Mitsch y Gosselink, 2007).

1.1.3 Funciones y valores de los humedales

Los humedales cumplen funciones que benefician a todos los organismos, comprenderlo y aceptarlo le ha llevado a las sociedades humanas miles de años.

En los humedales se dan determinados procesos naturales que directa o indirectamente influyen en los organismos vinculados a los mismos. La perspectiva con que se han estudiado y analizado estos procesos presentan un enfoque antropocentrista, de manera que las funciones presentadas a continuación están dirigidas al análisis de como éstos procesos benefician principalmente a las sociedades humanas. A continuación se detallan las principales funciones de los humedales:

- *Mitigación de inundaciones:* cuando ocurren precipitaciones, el agua de escorrentía circula desde zonas altas a las bajas, al encontrarse con el humedal disminuye su velocidad y poder erosivo, luego comienzan a fluir de forma uniforme y lenta (Dugan, 1992), minimizando así los efectos del desborde de ríos, arroyos y otros cuerpos de agua (Williams, 1991).
- *Disminución de la erosión en zonas costeras:* de forma similar a la anterior, pero en zonas costeras, los humedales protegen las costas mediante la disminución de la energía con que llega el agua de mar. Actúan a través de la reducción en la velocidad de las aguas y mediante la retención de sedimentos por parte de las raíces disminuyendo el poder erosivo de las aguas (Williams, 1991). Williams (1991), Mitsch y Gosselink (2007) denominan a esta función “buffer”. Actualmente se presenta como un elemento fundamental en la conservación de áreas costeras amenazadas, debido a los efectos del crecimiento en el nivel del mar, provocado por el cambio climático (Williams, 1991).
- *Trampas de sedimentos:* la velocidad del agua disminuye una vez que llega al humedal, esto provoca que el agua pierda competencia y disminuya su capacidad de carga para mantener los sedimentos en suspensión obligando a que se dé su deposición. Esto genera dos situaciones, los sedimentos portadores de sustancias tóxicas pueden ser depositados por decantación en el área, o pueden ser tomados por las plantas y descompuestos lentamente, como en el caso de los fertilizantes. En ambos procesos, se obtiene como resultado la purificación de las aguas, haciendo que las mismas lleguen más limpias a los cuerpos de agua. La retención de los sedimentos en el humedal también

genera una disminución en la turbidez de las aguas, permitiendo una mayor penetración de luz solar y llevando en consecuencia un incremento de organismos, debido a una serie de procesos encadenados (Williams, 1991). Ésta función ha estimulado a la sociedad, la cual comenzó a utilizarlos como purificadores de desechos humanos y animales, creando en muchos casos, humedales artificiales capaces de limpiar las aguas provenientes de saneamientos y de desechos producto de actividades productivas (Williams, 1991).

- *Ecosistemas muy productivos*: los humedales componen uno de los ecosistemas más productivos de la tierra, mediante fotosíntesis son generadores de grandes cantidades de biomasa vegetal (producción primaria), la cual sostiene una importante red trófica (Williams, 1991).

- *Hábitat*: los humedales son hábitat de diferentes especies de plantas y animales. Algunas dependen completamente de éste para su sobrevivencia, mientras otros lo utilizan en momentos concretos como la nidificación, la cría o el establecimiento temporal, como en el caso de las aves migratorias (Williams, 1991). Constituye un ecosistema con una biodiversidad muy importante albergando más del 40 % de las especies del mundo (tomando únicamente humedales de aguas dulces) (Ramsar, 2000d).

- *Recarga de acuíferos*: otra función constituye la recarga de acuíferos, existen determinados humedales, desarrollados en litologías permeables, que permiten el intercambio de las aguas (Ramsar, 2000e). En estos casos se da un intercambio de aguas, cuando el humedal presenta elevado nivel de agua se da un flujo que aporta a las aguas superficiales, dándose la situación inversa cuando en nivel del agua en el humedal decrece (Mitsch y Gosselink, 2007).

- *Regulación climática*: los humedales capturan y emiten gases de efecto invernadero. El CO₂, atmosférico, producto de las actividades industriales entre otras fuentes, constituye el principal gas de efecto invernadero. La vegetación y la microfauna de los suelos de humedales, capturan y almacenan importantes cantidades del gas aportando a una disminución del contenido de CO₂ atmosférico. Por otra parte, los humedales, aportan cantidades significativas de metano (CH₄), otro gas de efecto invernadero, haciendo que los mismos se conviertan en receptores y emisores de gases que afectan el calentamiento global (Reddy, R., y DeLaune, R., 2008). Ambos procesos hacen que los humedales sean un elemento importante en la regulación climática de la Tierra.

Por otra parte, están los denominados valores de los humedales. Constituyen aquellos beneficios, directos o indirectos, que la sociedad obtiene producto de las funciones que desarrollan en los humedales (Ramsar, 2000e). Los siguientes son considerados los valores de mayor relevancia:

- Los suelos de los humedales son óptimos para cultivos por dos motivos principalmente: el primero es la tendencia de estos suelos a presentar fertilidades altas, producto de los importantes porcentajes de materia orgánica y nutrientes que poseen. El segundo esta dado por la baja erodabilidad de sus suelos fruto principalmente de sus escasas pendientes (Williams, 1991). Estos dos elementos hacen que puedan realizarse distintos tipos de cultivos y en consecuencia que muchas sociedades dependan de estos para su subsistencia.
- La extracción de turba de los humedales es utilizada principalmente como combustible, pero también, tiene como destino el abono y otras actividades domésticas (Williams, 1991).
- La pesca constituye una importante actividad productiva desarrollada en los humedales. Muchas de las especies de peces comerciales dependen de este hábitat para vivir (Mitsch y Gosselink, 2007). Vinculado a las actividades recreativas y turísticas también se da la caza deportiva de otros animales.
- La madera extraída es utilizada principalmente como materiales para la construcción (Mitsch y Gosselink, 2007).
- La investigación, recreación y el turismo son actividades desarrolladas en los humedales, si bien no se consideran valores fundamentales permite a las comunidades humanas desarrollar actividades que ayudan a mejorar la calidad de vida. Actualmente en algunas áreas este tipo de actividades están siendo promocionadas con una doble función, la protección de estas áreas y el desarrollo del turismo, mediante una modalidad de turismo responsable (Williams, 1991).
- Los humedales son considerados bancos genéticos, en estos, existen distintas plantas que actualmente son utilizadas por la medicina para la generación de medicamentos (Ramsar, 2000e). Asimismo existen otras series de plantas, que si bien no han sido estudiadas con estos fines, podrían constituir un potencial para futuras aplicaciones en la ciencia de la salud.

La eliminación de un humedal lleva necesariamente a la pérdida de estas funciones, Las sociedades actuales, tras años de intentar eliminarlos, enfrentan las consecuencias de estos actos, destacándose la contaminación de las aguas, inundaciones, aumento de la erosión costera, pérdidas de biodiversidad, entre otras.

1.1.4 Funcionamiento de los humedales.

La hidrología es uno de los factores más importantes en el control de un humedal, y las variables que determinan la hidrología son principalmente el clima y la geomorfología. Si bien los humedales no están condicionados por un clima en particular, las áreas lluviosas

y frías, donde la evapotranspiración se ve disminuida, presentan mayores posibilidades de que sus suelos permanezcan saturados de agua por mas tiempo, mientras que zonas con escasas precipitaciones y mayores temperaturas tendrán mayor pérdida de agua por evapotranspiración y por tanto menos probabilidad de que se desarrollen condiciones para la formación de humedales (Mitsch y Gosselink, 2007). La geomorfología del área genera superficies con diferentes pendientes, de lo que dependerá si las aguas de precipitación escurren o permanecen almacenadas. Así, terrenos con pendientes importantes, aumentan las posibilidades de presentar mayor escurrimiento superficial, producto de lo cual los suelos tenderán a presentar drenajes buenos. De forma contraria en aquellas zonas planas el agua permanecerá almacenada creando las condiciones para el desarrollo de suelos saturados de agua, en los cuales la vegetación que crezca será aquella capaz de adaptarse a estas condiciones (Mitsch y Gosselink, 2007).

Los humedales se encuentran condicionados por lo que se denomina hidropereodo el cual constituye el presupuesto de agua, es decir, el balance entre el agua que ingresa al humedal y el que sale (Mitsch y Gosselink, 2007). Los ingresos de agua están dados principalmente por flujos superficiales (ya sea cursos hídricos, aguas de escurrimiento superficial, canalizaciones, etc.), precipitación y flujos de aguas subterráneas. Las pérdidas de agua están dadas por evapotranspiración, flujos de agua hacia zonas profundas y flujos superficiales.

El régimen hídrico condiciona las características del humedal principalmente a través de dos factores, la permanencia del agua y la procedencia de la misma. De la primera dependerá la cantidad de oxígeno presente en el suelo, lo cual resultará en un tipo de vegetación y microfauna que pueda adaptarse a condiciones de déficit de oxígeno. Del segundo depende el tipo de sedimentos y componentes químicos que llegan al humedal y a lo cual la vegetación dará una respuesta vinculada a la cantidad de nutrientes que llegan. La biota de un humedal, responderá a los cambios en las condiciones externas, modificaciones en la hidrología, podrá llevar a importantes cambios en la composición de especies, riqueza y productividad (Mitsch y Gosselink, 2007).

1.1.5 Clasificación de los humedales

La clasificación de humedales, es realizada desde principios del Siglo XX. Los propósitos se han ido modificando acompañando el cambio en su concepción (Mitsch y Gosselink, 2007), la que paso de una necesidad de comprenderlos para drenarlos o sacar provecho de ellos, a la necesidad de conservarlos debido a las funciones que cumplen y servicios que brindan.

Los objetivos con que fueron desarrolladas las distintas clasificaciones siguen hoy vigentes, entre estos se destacan el hecho de que permitan inventariarlos, evaluarlos y manejarlos (Cowardin *et al*, citado en Mitsch y Gosselink, 2007). Mediante la clasificación se logra agrupar ecosistemas con atributos similares (geomorfología, vegetación, hidrología, etc.). Permitiendo que el manejo sea común a cada tipo de humedal, y consiguiendo un marco unificado en las clasificaciones, logrando de este modo, que el manejo sea coherente en las distintas áreas y tiempos. Por otra parte permite generar un lenguaje común para que los inventarios, las terminologías y conceptos sean unificados y todos se refieran a una mismo elemento (Mitsch y Gosselink, 2007).

Existen diferentes clasificaciones a nivel mundial, muchas de ellas corresponden a áreas específicas o trabajos particulares, no aplicables a humedales de todo el mundo (Berlanga y Ruiz, 2004). Las clasificaciones más utilizadas, que poseen alcance global, son la Clasificación de Ramsar y la Clasificación de Humedales y Hábitats de Aguas Profundas de Estados Unidos, 1979. Ésta última, si bien se aplica en muchos casos, algunas veces fue utilizada como punto de partida para la elaboración de otras clasificaciones, y en otros casos, fue utilizada aplicándosele adaptaciones para ajustarla mejor a determinados territorios (Berlanga y Ruiz, 2004). La clasificación Ramsar, es reconocida por la mayoría de los estados mundiales, por lo que necesariamente debe tenerse en cuenta. La misma surge a partir de la convención realizada en Irán, en 1971.

La clasificación de Humedales y Hábitats de Aguas Profundas, fue desarrollada en el año 1979 por Cowardin, Carter, Golet y La Roe. Consiste en una clasificación jerárquica, dónde el sistema es la primer categoría, seguida por el subsistema, la clase, subclase y tipo dominante (Anexo 1). El sistema corresponde a la categoría de mayor jerarquía, en la cual se incluyen humedales y hábitats de aguas profundas que se encuentran afectados por los mismos factores geomorfológicos, hidrológicos, biológicos y químicos (Mitsch y Gosselink, 2007). El subsistema está definido básicamente por el factor hidrológico, mientras que la clase da la apariencia general del humedal en términos de vegetación, considerando formas de vida, fisiografía o el sustrato. La subclase y tipos dominantes corresponden a detalles de las clases (Mitsch y Gosselink, 2007).

Este sistema es utilizado por ser fácilmente aplicable, ya que utiliza las formas de vida para la clasificación biológica, no requiriendo de personal experto para su uso. Asimismo, dada la generalidad que presenta en términos biológicos, permite el aprovechamiento de las tecnologías de percepción remota para su clasificación (Berlanga y Ruiz, 2004). Sin embargo, presenta como desventaja los parámetros físicos, químicos y biológicos utilizados en la distinción de clases y demás niveles jerárquicos inferiores, ya que son difíciles de medir en trabajos de gran escala (Berlanga y Ruiz, 2004). Céspedes (1995)

realiza un análisis de la clasificación en la que desarrolla las ventajas y desventajas de la misma, e incorpora en la discusión la clasificación realizada por Dugan en 1992..

El *sistema de clasificación Ramsar*, desarrollado para brindar un marco general que permita la fácil identificación de los hábitats de humedales más relevantes del mundo, propone 3 Categorías a partir de las cuales surgen los tipos de hábitats de humedales, estas son los Humedales Marinos y Costeros, Humedales Continentales y Humedales Artificiales (Anexo 1).

Esta clasificación presenta como ventaja la definición clara de los tipos de hábitats de humedales, lo que implica una simplificación al momento de identificar un humedal. Así, su existencia como una clasificación reconocida y utilizada a nivel mundial, permite utilizar un lenguaje común y por tanto unir esfuerzos para investigar, definir políticas y planes de manejo para cada tipo de humedal. Sin embargo, plantea algunas dificultades dado que es estricta y claramente definida, no dando lugar a posibles casos particulares que puedan surgir. Por otra parte, la carencia en el establecimiento de límites entre tipos, en lo referente a los parámetros químicos, físicos y biológicos, genera incertidumbres cuando se realiza la clasificación (Semeniuk y Semeniuk 1997; Carrera y de la Fuente, 2003, citados en Berlanga, y Ruiz, 2004). A modo general, es una clasificación que nombra cada tipo de humedal, careciendo de una organización en su estructura.

A pesar de estas dificultades, mediante esta clasificación Ramsar ha dado un marco que permite establecer ideas comunes a nivel mundial, y dónde todos los países hablen un mismo lenguaje, que permita entendernos y trabajar de forma conjunta. Es por esto que para el presente trabajo se propone utilizar esta clasificación, debido a que Uruguay no cuenta actualmente con una clasificación propia y tampoco reconoce una clasificación para el país. Por otra parte es miembro de la convención Ramsar, y actualmente son reconocidas dos áreas Ramsar en el país. Por tales motivos en el resto del trabajo nos referiremos a la clasificación Ramsar, pero sin dejar de tener en cuenta otras clasificaciones.

1.1.6 Humedales: un enfoque histórico.

La palabra humedal, es un término relativamente nuevo que comienza a utilizarse recién a partir de los años 70, en una época que se inicia una nueva etapa en la percepción de los mismos (Mitsch y Gosselink, 2007). La sociedad debió pasar por distintas fases en su relacionamiento con los humedales, hasta comprender la importancia que estos tienen para el funcionamiento de los sistemas naturales y así comprender la necesidad de conservarlos. Desde los inicios de la civilización existieron dos tipos de culturas que se relacionaron de formas muy diferentes con los humedales. Por un lado, aquellas que aprendieron a vivir en armonía encontrando en ellos un beneficio y por otro lado las culturas que los evitaron y

los transformaron hasta alcanzar un ecosistema totalmente distinto al original (Mitsch y Gosselink, 2007). En este contexto, Dugan en 1993 presentó dos tipos de civilizaciones, las hidráulicas y las acuáticas (Dugan, 1993, citado en Mitsch y Gosselink, 2007). Las primeras lograron controlar el flujo del agua mediante la utilización de distintas tecnologías como diques, embalses, bombas de drenaje, etc. Las segundas se adaptaron a las condiciones naturales y aprendieron a utilizar sus ventajas (Dugan, 1993, citado en Mitsch y Gosselink, 2007). La historia mundial muestra que prosperó el tipo de manejo realizado por las civilizaciones hidráulicas, llevando a muchas naciones a la pérdida parcial y en algunos casos casi total de los humedales (Mitsch y Gosselink, 2007).

Como objeto de estudio los humedales son analizados tempranamente, desde el momento en que comienzan las prácticas de cultivos se inicia un análisis del comportamiento (Boulé, 1994). Así, civilizaciones como la China, pudieron realizar cultivos de arroz desde hace 5000 años, y más tarde en América los Mayas, Incas y Aztecas también realizaron sus cultivos en humedales utilizando diferentes técnicas para su aprovechamiento (Boulé, 1994).

Las primeras civilizaciones mesopotámicas y luego las egipcias supieron comprender las bondades de la naturaleza. Hicieron una exploración de la misma, analizando el comportamiento hidrológico de los cursos hídricos y luego sacaron provecho de sus planicies fertilizadas naturalmente, tras las crecidas de los ríos Eufrates, Tigris y Nilo. Esto permitió el surgimiento de cultivos extensivos y ligados a estos, los primeros asentamientos humanos permanentes. En el análisis de la naturaleza supieron dar nombre a plantas y utilizar los juncos para realizar alfombras y fortalecer paredes de ladrillos hechos de arcillas (Boulé, 1994). Las pinturas egipcias en paredes, donde se dibujaron jardines de agua con papiros y juncos, muestran la importancia que estos daban a los humedales (Boulé, 1994). En Uruguay, grupos cazadores-recolectores hicieron uso de las planicies inundables, en zonas costeras, para conseguir alimentos, incluso estudios arqueológicos, han registrado pequeñas superficies que fueron cultivadas hace 3000 años AP (Capdepon, I. y Pintos, S., 2006)

Con Aristóteles y Teofrasto, en Grecia, comienza el análisis con un enfoque meramente científico sobre como las condiciones hidrológicas determinan la distribución de las especies (Boulé, 1994).

La civilización Romana, por otra parte, se caracterizó por una avance en lo que refiere a la ingeniería y terminología (Boulé, 1994). Estos desarrollaron sistemas de abastecimiento de aguas por acueductos para las ciudades. Se limitaron a realizar simples observaciones, con el fin de identificar zonas dónde poder captar aguas para sus obras. Hicieron asociaciones sencillas sobre la distribución de la vegetación, relacionando determinadas especies, como

los juncos, a la ocurrencia de suelos con altos contenidos de humedad, siempre con la misma finalidad (Boulé, 1994).

En la edad media éstos ecosistemas eran rechazados y evitados, dándose los primeros procesos de drenaje que permitieron el aprovechamiento de sus tierras con fines agrícolas. Uno de los ejemplos mas importantes es el drenaje de los Países Bajos en Europa que comienza en este período y que culminan recién a mediados del siglo XX con un plan de obras de gran magnitud, que impidiera la inundación de las tierras previamente ganadas al mar (Boulé, 1994).

Con el descubrimiento de América, luego del asentamiento de colonos, comienza un proceso de exploración de las nuevas tierras, es aquí, donde se realizan las primeras descripciones de los humedales (Boulé, 1994). Las primeras observaciones se efectúan en el territorio Estadounidense, donde se analiza el tipo de vegetación y los suelos. Con esto surge una visión de explotación de estas tierras, consideradas aptas para drenarlas y posteriormente cultivarlas. Pero los estudios continuaron, se describió la vegetación y su hábitat, la fauna y se realizaron colectas e ilustraciones de los pantanos, marismas y bosques. Ya para mediados del siglo XVIII se autorizaban los primeros drenajes (Dahl y Allord, 1997). Para ese entonces, los humedales eran pensados como tierras improductivas que prohibían la circulación terrestre (un impedimento para el desarrollo) y donde prosperaban enfermedades, por lo que el drenaje era considerado la opción más acertada (Dahl y Allord, 1997).

Mientras tanto en Europa, ya en el siglo XVIII, se realizaban estudios sobre la turba y su origen con fines de explotación para combustible o para su uso en la agricultura (Boulé, 1994).

A principios del Siglo XIX, el tema de la turba ingresa a Norte América y se inclina hacia una relación con las propiedades del suelo, buscando el objetivo único de mejorar sus propiedades para el aprovechamiento (Boulé, 1994). Los estudios se prolongaron en el país, y pasaron a la órbita estatal. El Estado realiza estudios, no específicos de los humedales, pero que generaban alguna información de éstos. En este período comienzan la especialización de las ciencias, cada investigador se ocupaba de una disciplina y no había lugar para la integración, por lo que cada área realizaba sus publicaciones de modo particular (Boulé, 1994).

En este siglo, el explorador Alexander Von Humboldt inicia sus viajes por el mundo, intentando describir la naturaleza. Surgen también en este momento observaciones de otros científicos, que incluían a la vegetación y fauna, y sus hábitats, dentro de los cuales se incluían los humedales. Progresivamente se empiezan a estudiar la distribución geográfica de las especies, donde se establecen límites a los humedales (Boulé, 1994).

A mediados del siglo XIX el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos comienza a analizar las inundaciones, consideradas como un problema, y a pensar soluciones a las mismas. Se realiza una densa red de caminería que afectaría directamente a los humedales, apoyado por un progreso tecnológico que permitía un drenaje rápido (Dahl y Allord, 1997). Mientras tanto, el servicio geológico de Estados Unidos realizó la identificación de los recursos minerales del país, reconociendo a la turba como uno de éstos (Boulé, 1994).

Se comenzó a vincular los suelos, las aguas y otros factores, con el crecimiento y distribución de las plantas. En estos se incluyó la capacidad de las plantas hidrófilas de adaptarse a las condiciones hídricas del medio, ph, salinidad, clima, etc. (Boulé, 1994).

Pero el progreso continuaba y con él la necesidad de tierras. Es así que entre mediados de 1800 y principios del 1900 ya se constataba la pérdida de varios humedales en Norteamérica debido a drenajes. Pero los impactos mas importantes se dieron en el siglo XX, aquí la tecnología desarrollada había avanzado de forma tal, que eran manipulados pequeños y grandes humedales. El crecimiento demográfico ejerció presión mediante la necesidad de mayor cantidad de tierra para abastecer de productos a las poblaciones crecientes. En los años 1930, el Gobierno de EE.UU. brindaba servicios gratuitos de ingeniería a los agricultores con la finalidad de drenar los humedales, y hasta llego a cubrir parte de los costos del drenaje (Dahl y Allord, 1997).

Pasados los años 1950 un importante número de hectáreas de humedales se habían perdido en todo el mundo y tras observar las consecuencias de las intervenciones, se comienza a dar un giro en la visión de los humedales. Se comienzan a estudiar sus funciones y servicios y a emplear la palabra humedal, es aquí que prospera la conciencia sobre su importancia. Por otra parte el cruce de disciplinas principalmente geomorfología, hidrológica y sedimentología permiten un conocimiento más integrador de los mismos (Williams, 1991).

Finalmente con la convención Ramsar del año 1971 queda expresado a nivel mundial el cambio en la perspectiva del hombre con respecto a los humedales. Uruguay recién se adhiere a la convención en el año 1982, mediante la ley N° 15.337. En el año 1984 propone la primera área Ramsar denominada Bañados del Este y luego en el 2004 propone la segunda y última área llamada Humedales de Farrapos e Islas del Río Uruguay.

1.1.7 Degradación y pérdida de los humedales en el mundo

La convención Ramsar, considera la degradación de humedales como el deterioro de las funciones del ecosistema producto de las actividades humanas, y la pérdida como la

transformación de humedales a zonas de no-humedales como resultado de dichas actividades (Frazier *et al*, 1996). Normalmente la pérdida esta asociada a una previa degradación, no sucediendo lo mismo a la inversa, una degradación no implica pérdida. La degradación puede invertirse mediante la restauración del humedal o de las funciones perdidas, pero la pérdida es más dificultosa de revertir, lógicamente es más sencillo reestablecer funciones, mediante programas de conservación, que intentar recomponer un humedal que actualmente se desempeña como otro ecosistema (Frazier *et al*, 1996). Los esfuerzos para restaurar un humedal degradado dependerán en gran medida de que el ecosistema haya superado su umbral de resiliencia, es decir, el ecosistema tendrá la capacidad de amortiguar las perturbaciones volviendo a su estado inicial (Holling, 1973, citado en Achkar *et al*, 2003), pero a medida que éstas se vuelven más extremas esta capacidad se ve superada y su retorno a la situación original se torna más difícil.

Las causas de las pérdidas y degradación de los humedales son diversas dependiendo de las áreas geográficas, las actividades económicas y la cultura de la que se trate, pero el impacto más relevante y generalizado es provocado por los drenajes, el dragado y el relleno (Mitsch y Gosselink, 2007); aunque debe tenerse en cuenta, que la degradación y pérdida de humedales está directamente vinculada a las actividades que se realizan en el humedal, e indirectamente a las que se practican en la cuenca a la que pertenecen (Frazier *et al*, 1996).

Los drenajes, el primer objetivo perseguido es eliminar el contenido de agua de los suelos ricos en materia orgánica, para luego utilizarlos con fines agrícolas principalmente (Mitsch y Gosselink, 2007). Esta actividad provoca cambios totales y el ecosistema generalmente evoluciona hacia otro diferente, con funciones también diferentes. El primer cambio se da en el sistema hidrológico, debido a la eliminación de las aguas estancadas y la desviación de los flujos de las aguas. Esto provoca un cambio en los suelos que encuentran modificadas sus condiciones, agravándose por la modificación de la vegetación debido a la introducción de especies agrícolas (Williams, 1991).

El relleno puede realizarse con distintos fines como ser las construcciones de grandes obras de infraestructura, carreteras, represas, aeropuertos y hasta ciudades. En este proceso las consecuencias sobre los humedales son variables dependiendo de la magnitud de la obra, en algunos casos se mantiene el humedal con algunos cambios, como sucede en algunas carreteras de nuestro país, y en otros casos las pérdidas son totales. La construcción de represas genera un cambio en el régimen hidrológico dándose la generación de nuevos humedales en los embalses y la pérdida de los que se localizan aguas abajo. La deforestación, es otra actividad común principalmente en manglares, en los que se extrae la madera para fines comerciales y en algunos casos, como en los manglares del norte de Perú y Ecuador, son talados para crear piletas de cría de camarones (Canevari *et al*, 2001).

Por otra parte existen casos en que la deforestación es efectuada en la cuenca alta provocando la degradación de los suelos y con esto la colmatación de los humedales de la cuenca baja. El pastoreo, actividad común en nuestro país practicada comúnmente en los meses de verano cuando las praderas sufren la pérdida de agua por las altas temperaturas y la carencia de precipitaciones, provocan un cambio en el tapiz vegetal y genera la compactación de los suelos por el pisoteo del ganado. Así mismo la contaminación de los humedales por distintos factores provoca la pérdida de biodiversidad al igual que la caza y la pesca descontrolada. La minería y la extracción de minerales es otra de las causas de la pérdida de humedales (Mitsch y Gosselink, 2007).

No obstante, debe tenerse en cuenta que existe carencia de información que permita establecer la situación actual de todos los humedales del mundo. A escala mundial, cada país o región, posee intereses propios que no son comunes al resto, esto provoca que existan países dispuestos a invertir y realizar estudios en la temática y otros que no. Estos factores, asociados a las diferencias en los conceptos y terminologías sobre los humedales, impiden la posibilidad de una comparación mundial que permita establecer su situación actual. Según Frazierm, Moser y Prentice (1996) es Estados Unidos y algunos países de Europa que cuenta con mayor y mejor información, mientras que el resto de los países presentan estudios parciales enmarcados en áreas específicas.

A pesar de esto, Dugan y Jones (1993, citado en Frazierm *et al*, 1996) realizaron un estudio utilizando datos proporcionados por los distintos países ratificantes de Ramsar en el que establecen que el 84% de los sitios Ramsar están amenazados, si tomamos en cuenta que estos sitios actualmente poseen acciones y legislación para su protección, debemos pensar que un porcentaje mayor de los humedales del mundo podrían estar en condiciones de mayor vulnerabilidad. Por otro lado, se estima que en el año 1985 aproximadamente un 26 % de los humedales del mundo fueron drenados con fines agrícolas (Frazierm *et al*, 1996).

En Estados Unidos la pérdida de humedales ha sido importante al grado que se estima que los estados de Ohio-California y Florida perdieron el 90 y 91% de sus humedales respectivamente (Frazierm *et al*, 1996). En Canadá los drenajes, el crecimiento urbano e industrial, la construcción de grandes obras de infraestructura y la conversión hacia otros usos de los humedales, han generado serios desastres. En México, las pérdidas de los humedales originales se ubican en el entorno del 35% (Frazierm *et al*, 1996) y en Europa, superan el 50% del área original. Los humedales de Asia, vienen siendo afectados desde hace miles de años debido a la agricultura del arroz y a los drenajes de tierras para otros usos agrícolas, siendo las pérdidas importantes para la mayoría de los países del continente, alcanzando un total estimado del 27% (Frazierm *et al*, 1996). Nueva Zelanda y Australia, han perdido gran parte de sus humedales, al nivel que Cromarty (1996, citado en Frazierm *et al*, 1996) estima las pérdidas en un 90 %. En África y América del Sur la

información es escasa, pero se especula que un 2% se ha perdido en el primer caso y un 6% en el segundo. La degradación de los humedales de América del Sur, se viene incrementando en algunas áreas, este proceso, que se está dando de un modo acelerado, tuvo inicio en los últimos decenios. En el caso de África, la información es aún menor, pero se estima que las pérdidas también se están dando en varias regiones del continente (Frazier *et al*, 1996).

Ramsar considera que las repercusiones de la degradación y pérdida de humedales, son más importantes en países en desarrollo debido a que no pueden hacer frente mediante tecnologías a las consecuencias de las pérdidas de humedales. El caso contrario sucede en países desarrollados, donde las dificultades producto de estas pérdidas son mitigadas mediante grandes obras de infraestructura y cuentan con mayores recursos para establecer programas de protección.

1.1.8 Situación actual de los humedales en el Uruguay

Los ecosistemas de humedales representan un 4,56 % de la superficie del país, es decir 8051 km² (MTO, 2004). A pesar de esto son escasos los antecedentes que permitan conocer la situación actual de la totalidad de los humedales del país. Las investigaciones realizadas son individuales a cada organización, sin presentar vinculación con el resto. El Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA), mediante la división Áreas Protegidas y el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP), es la institución que actualmente reúne la información, pero al momento no se conoce de la realización de un diagnóstico nacional o de trabajos orientados en esta dirección.

De igual forma existen varios organismos que se han interesado en los humedales, generando información útil que proveerá antecedentes para la generación de dicho diagnóstico. De estos se destacan Bañados del Este, Bañados de Farrapos (ambos incluidos en la convención Ramsar), humedales de la desembocadura del Río Santa Lucía, Bañados de Carrasco y determinados humedales vinculadas a otras áreas protegidas como sucede en los casos de las lagunas costeras. Estas últimas en su mayoría son integrantes de la Reserva de la Biosfera Bañados del Este de los cuales se han efectuado estudios específicos, con el fin de conservar los sistemas vinculados a los cuerpos de agua.

Los humedales de la costa este, vinculados a las lagunas costeras, han sufrido la presión por actividades turísticas y por el crecimiento urbano destinado a tal fin, siendo los casos más representativos las lagunas de José Ignacio y Garzón. Esta última, actualmente, se encuentra amenazada por la construcción del puente que continuaría la ruta nacional N° 10 (SNAP, S/Fa) y que se estima causará daños importantes directamente por su construcción

e indirectamente por la posible dinámica de urbanización posterior. En el caso de Laguna de Castillos las amenazas se dan por la quema de pajonales para facilitar el pastoreo y la agricultura (SNAP, S/Fa).

La Laguna de Rocha presentaba como amenaza un fraccionamiento en el borde costero de la laguna realizado en 1940 con fines de urbanización (Comisión Asesora Específica Provisoria del Área protegida Laguna de Rocha, 2008), pero el hecho de que no se hayan realizado construcciones y que el área haya ingresado al SNAP, permite la realización de un plan de gestión previo, minimizando los impactos en los humedales y en todo el sistema. La cercanía de esta laguna al importante centro turístico Balneario La Paloma, genera en épocas estivales una mayor concurrencia turística. Esto constituye una amenaza debido a la existencia de poco personal de guardaparques, quienes actualmente no pueden controlar los ingresos ni la totalidad de las actividades que allí se realicen (Comisión Asesora Específica Provisoria del Área protegida Laguna de Rocha, 1998). Los humedales de esta laguna cumplen la función de purificar las aguas antes de su descarga al mar. El saneamiento de la ciudad de Rocha es volcado a los cursos que desaguan en la laguna, constituyendo el pasaje del agua por los humedales un filtraje previo a la desembocadura en el mar.

Los humedales asociados a la Laguna Negra, próximos al Balneario La Coronilla, se encuentran entre los más perturbados por actividades productivas. El impacto más importante lo constituye la construcción del Canal Andreoni en la década del 80 con el objetivo de desecar los humedales para ganar tierras fértiles con fines agrícolas, como consecuencia de esto se ven perturbados por un tipo de cultivo de fuerte impacto como lo es el arroz.

La Laguna Merín y sus humedales se localizan en los departamentos de Cerro Largo, Rocha y Treinta y Tres, forman parte de Ramsar y del Programa el Hombre y la Biosfera (MAB-UNESCO). Estos humedales son los responsables de más del 60% de la producción de arroz del país, lo que provoca un uso intensivo de sus suelos. En la investigación realizada por Panario y Gutiérrez (1995) se analizan los efectos del cultivo de arroz sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos, siendo los siguientes algunos de los más relevantes: modificaciones en la estructura de los suelos, compactación de horizontes y formación de suela de arada (asociado a una menor penetración de las raíces y disminución de los movimientos de agua y aire), posible contaminación de napas y cursos por aplicación de fertilizantes, desprendimiento de gases a la atmósfera como el nitrito y el metano, contaminación por uso de plaguicidas. Otras actividades que amenazan los humedales de la Laguna Merín son el cambio en el tapiz vegetal, pérdida de monte indígena, caza, pesca y una serie de obras de ingeniería que modifican los procesos

hidrológicos, buscando beneficiar a los productores que desarrollan actividades agrícolas en el área.

Los bañados de Carrasco, en los departamentos de Canelones y Montevideo representan un buen ejemplo de la perspectiva con que eran encarados estos ecosistemas previamente a los años 70. Este constituye el humedal más intervenido a nivel nacional. Entre las actividades que provocaron la situación actual de los mismos se encuentran la desecación (decreto del poder ejecutivo en 1975), la reforestación con especies exóticas, el vertido de diferentes efluentes altamente contaminantes, tala de la árboles, extracción de turba y presencia de asentamientos (Horta, 2002). En el año 2000 fue declarado de interés nacional su recuperación, justificado por su importante función como depurador de las aguas del arroyo Carrasco (Horta, 2002), pero su situación actual continúa siendo crítica.

Los humedales del Río Santa Lucía son compartidos por tres departamentos Canelones, Montevideo y San José, el estado de los éstos difiere mucho de los anteriores a pesar de encontrarse próximo a las ciudades de Montevideo y Del Plata. De igual forma en el área se han dado distintas perturbaciones como la caza, tala de árboles, extracción de arenas y conchillas, quema de pajonales, entre otras actividades (IMM, 2009). Recientemente han sido incorporados al SNAP.

En las márgenes del Río Negro, entre Nuevo Berlín y San Javier, en el departamento de Río Negro, se localizan los Esteros de Farrapos. Estos bañados constituyen un área con un importante grado de naturalidad, dónde las principales actividades productivas son la ganadería y la pesca (SNAP, S/Fc). Se estima que éste humedal podría estar siendo afectado por actividades desarrolladas en la cuenca alta, como por ejemplo las modificaciones que se dan en el régimen hídrico del Río Uruguay debido a la represa de Salto Grande y el aumento de los aportes de sedimentos por erosión de suelos. Más directamente el humedal sufre alteraciones por actividades antrópicas en el borde norte contra la localidad de San Javier (Cayssials *et al*, 2002), de igual forma es considerado un ecosistema poco intervenido.

Por otra parte los humedales localizados en el centro este del país en las planicies de los cursos hídricos tributarios del Río Negro actualmente no se conoce que cuenten con ningún tipo de protección ni análisis de situación, debiéndose considerar que estos representan un 34% de los humedales del país con una superficie total de 2754,71 Km².

A modo general se puede concluir que muchos de los humedales del Uruguay hoy cuentan con organismos que trabajan para su protección e investigación, pero el país requiere un análisis global, con un diagnostico espacial detallado de las amenazas a las que están expuestos. Pero a modo de justificación debe tenerse en cuenta que el país inicio hace poco tiempo actividades de protección. El marco legal para generar un sistema nacional de áreas

protegidas es muy reciente, y por tanto es natural que todavía quede mucho trabajo por hacer.

1.2 Las técnicas de teledetección y la evaluación de los humedales

Se reconoce a la teledetección como el conjunto de procesos por los cuales se obtiene información de la superficie terrestre sin estar en contacto con ella. Los sensores captan la energía solar reflejada o la emitida por los cuerpos terrestres que luego se traducirán en imágenes o información numérica a partir de los Niveles Digitales (Chuvieco, 1990).

Desde la década del 60, diferentes disciplinas han comenzado a utilizar este tipo de técnicas en sus análisis. En geografía ha sido muy útil en cartografía de usos del suelo, monitoreo de la evolución temporal de estos usos, detección de conflictos, generación de unidades de paisaje, entre otras aplicaciones. Los estudios sobre el comportamiento de la vegetación y su distribución espacial es un campo que se está desarrollando en disciplinas como agronomía, biología (principalmente ecología) y geografía. A partir de las diferencias en las reflexiones y emisiones que los sensores captan, pueden inferirse distintos tipos de vegetación, y en el caso de existir imágenes para un periodo de tiempo dado, analizar la evolución temporal y espacialmente. Para el presente trabajo esta última línea de trabajo dentro de la teledetección será la que se desarrolle.

1.2.1 Sensores

Los sensores son instrumentos que capturan la energía reflejada o emitida por los cuerpos terrestres. Existen varios tipos de sensores con características diferentes que permiten el uso combinado dependiendo de las ventajas de cada uno. Así se pueden utilizar sensores de alta resolución espacial pero con menor resolución temporal y sensores con baja resolución espacial pero alta resolución temporal, alcanzando estudios más completos y sujetos a las necesidades del investigador (Paruelo, 2008). Aguado, Salas, Cocero y Riaño, concluyeron, en un estudio sobre estimación del contenido de humedad y percepción remota, que las imágenes Landsat y Spot Vegetation brindaban una importante correlación en cuanto a los cálculos de NDVI realizados, lo que hace aceptable la combinación de ambas imágenes para estudios que utilicen estos índices, a pesar de las diferentes resoluciones, 30 m. y 1km. respectivamente (Aguado *et al*, 2001).

1.2.1.1 Satélite Landsat 5 TM

El satélite landsat 5 fue lanzado en el año 1984 por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) junto al U.S.Geological Survey (USGS) y aun se encuentra en

funcionamiento. Este satélite lleva a bordo el sensor TM (Thematic Mapper) que permite obtener resoluciones espaciales que alcanzan los 30 metros y una resolución espectral buena (Tabla 1), lo que hace al satélite un importante instrumento para el estudio de los recursos naturales a una escala espacial más que aceptable. El satélite Landsat 5 opera en las siguientes bandas del espectro electromagnético:

Tabla 1. Características espectrales del sensor a bordo del satélite Landsat 5 TM. Tomado de Chuvieco, 1990.

Banda	Intervalo espectral (μm)
1	(0,45 - 0,52)
2	(0,52 - 0,60)
3	(0,63 - 0,69)
4	(0,76 - 0,90)
5	(1,55 - 1,75)
6	(10,4 - 12,5)
7	(2,08 - 2,35)

Estas imágenes presentan como gran ventaja la resolución espacial con que son obtenidas, y como desventajas la cantidad de información generada y su distribución a un costo elevado. Existen algunos organismos que brindan imágenes gratuitas, pero estas no corresponden a imágenes capturadas en fechas regulares.

1.2.1.2 Satélite SPOT VGT.

El sensor a bordo del satélite SPOT 4 (Système Probatoire d' Observation de la Terre) fue lanzado en marzo del 1998 por CNES (Centre National d' Etudes Spatiales) de Francia en coordinación con Bélgica y Suecia (CNES, 2010), desde entonces el programa "Vegetation" brinda gratuitamente imágenes de NDVI de todo el mundo. En el año 2002 es lanzado el satélite SPOT 5, que posee al igual que el anterior, un sensor HRVIR (en el SPOT 5 denominado HRG, corresponde al mismo sensor pero con pequeñas mejoras), un sensor Vegetation 2, igual al Vegetation 1 del SPOT 4 y un tercer sensor denominado HRS (Tabla 2) (CNES, 2010). Este último sensor permitió mejorar la resolución espacial de las imágenes y realizar estereoscopia.

Cada mes son ofrecidas imágenes síntesis de 10 días (VGT- S10), obteniéndose 3 imágenes por mes, que son generadas para los días 1, 11 y 21 (Vegetation Programme Vegetation, 2010). Estas son generadas utilizando las máximas reflectancias de los 10 días para cada píxel. Dichas imágenes ya son ofrecidas con la corrección geométrica (sirven para dar coordenadas cartográficas a la imagen y para poder realizar estudios

multitemporales, en estos se modifica solamente la posición del píxel y no sus ND (Chuvieco, 2002) y radiométrica (son aquellas correcciones que se realizan a los ND captados para eliminar distorsiones generadas por la atmósfera, debidas a la dispersión de la radiación por componentes de la misma, o por funcionamiento errático del sensor, como ser píxeles perdidos (Chuvieco, 2002). Las imágenes síntesis de NDVI son ofrecidas con una resolución espacial de 1Km², en formato HDF y son calculados a partir de información espectral, tabla 2 (Vegetation Programme, 2010).

Debe mencionarse que hasta enero del 2003 se estuvo operando con VGT S1 luego comenzó a operar el sensor VGT S2, existiendo pequeñas diferencias en las características espectrales (Vegetation Programme, 2010), que se deberán tener en cuenta al momento de realizar el análisis de los datos.

Todas estas características hacen de estas imágenes un excelente instrumento para realizar estudios multitemporales debido a la cantidad y regularidad de sus datos. Asimismo su distribución gratuita constituye una ventaja más. En contrapartida, como desventaja, se presenta la resolución espacial que no permite realizar análisis visuales a grandes escalas.

Tabla 2. Características espectrales de los sensores SPOT 4 y 5.
Tomado de Vegetation Programme, 2010

Características espectrales		
Bandas espectrales	VEGETATION 1	VEGETATION 2
BLUE (B0)	0.437 - 0.480 μm	0.438 - 0.475 μm
RED (B2)	0.615 - 0.700 μm	0.615 - 0.690 μm
NIR (B3)	0.772 - 0.892 μm	0.782 - 0.890 μm
SWIR (MIR)	1.600 - 1.692 μm	1.582 - 1.685 μm

1.2.2 Índice Verde

Los estudios en ecología generalmente se han enfocado en la estructura de los ecosistemas utilizando las imágenes como herramientas visuales que permiten la diferenciación entre tipos estructurales de ecosistema. Paruelo introduce la idea de trabajar con el funcionamiento ecosistémico, entendido como la transferencia de energía y materia entre la atmósfera y biota (Virginia y Wall, 2001, citado en Paruelo, 2008), estudiada a partir de la información captada por los sensores remotos. El funcionamiento ecosistémico es medido por flujos de materia y energía, que en caso de la teledetección pueden transformarse en valores de absorción de energía que es utilizada en la fotosíntesis y que

luego se presenta como biomasa generada (masa que compone un ecosistema por unidad de área o volumen) (Carpenter, s/f)

La biomasa generada por las plantas corresponde a una parte importante de la producción primaria responsable de brindar energía a los productores secundarios y por tanto de mantener en gran medida el ecosistema (animales, descomponedores) (Capter, s/f).

La transformación de la energía captada por los sensores a variables biofísicas es una herramienta potente en estudios de funcionamiento ecosistémico Este tiende a mostrar los cambios ecosistémicos más rápidamente que la estructura, por lo que los cambios en el ambiente, debidos a distintos factores, primero se reflejaran en un cambio en la productividad primaria, en el carbono almacenado, en un cambio en los nutrientes, etc y luego con el tiempo se reflejará en un cambio estructural. Esto lo convierte en un elemento fundamental para la gestión ambiental del territorio aportando tiempo para la acción temprana (Paruelo, 2008). El Índice Verde Normalizado (IVN) o Normalized Diference Vegetation Index (NDVI) ha sido el más utilizado en este sentido (Chuvienco, 1990) (Paruelo, 2008). Comúnmente es reconocido como un estimador de la condición y presencia de la vegetación (Paruelo, 2008).

Previamente a la definición de NDVI, se debe hacer referencia a las características de la vegetación en términos de la energía reflejada, emitida y absorbida. Estudios realizados para evaluar el comportamiento espectral de la vegetación han permitido la generación de una curva teórica de reflectividad de la vegetación o signatura espectral de la misma (Gráfico 1).

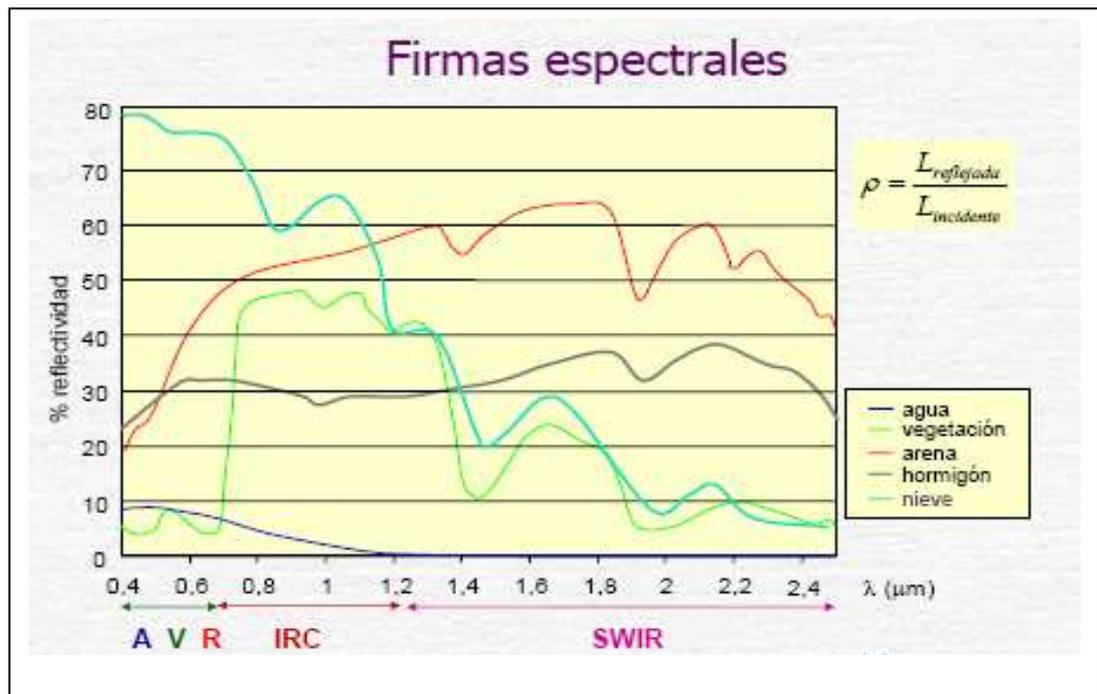


Gráfico 1. Firmas espectrales.
Tomado de Chuvienco, 2009

La firma espectral de la vegetación muestra la existencia de dos picos de reflectividad (relación entre el flujo incidente y el reflejado por una superficie, donde la suma de la reflectividad, transmisividad y absorptividad es =1). La vegetación presenta, dentro de la porción del espectro que interesa para el presente trabajo, una baja reflectancia en la porción del espectro visible, exceptuando un máximo relativo en el verde. La baja reflectividad se debe a la absorptividad por parte de los pigmentos de la hoja, principalmente la clorofila, que utilizan la energía incidente para la fotosíntesis, y el máximo en el verde se debe a una menor absorción (Chuvienco, 1990). La reflectividad más elevada se da en el infrarrojo cercano, producto de la estructura interna de la planta, la cual varía dependiendo del tipo de planta. Esto último justifica que la utilización de la banda del Infrarrojo Cercano sea considerada óptima para discriminar entre tipos de cubierta vegetales (Chuvienco, 1990).

En la fracción del espectro de 1,4 micrómetros, el agua de las plantas absorbe la energía incidente y por tanto la reflectividad se encuentra disminuida notablemente lo que permite conocer el comportamiento de la vegetación asociada a las condiciones hídricas. La vegetación con poco contenido de humedad en su estructura presentará mayor reflectividad en esta parte del espectro electromagnético (Chuvienco, 1990).

La gran diferencia de reflectividad de la vegetación entre el rojo e infrarrojo permite comparar el vigor de la vegetación. Cuanto mayor sea el contraste entre ambas mayor vigor presentará la vegetación, dado que absorbe mucha radiación incidente en el visible para la realización de la fotosíntesis y refleja mayor cantidad de energía en el IR debido a la estructura interna de las plantas. Cuando la hoja de la planta se encuentra enferma o senescente (cambio en su estructura interna) tenderá a disminuir los procesos fotosintéticos y por tanto aumentará la reflectividad en el rojo, mientras que en el infrarrojo se dará la disminución de la reflectividad debido al deterioro de la estructura celular de la planta (Chuvienco, 1990).

A partir de estos surgen los denominados Índices de Vegetación los cuales relacionan la banda R y la IR. Las plantas convierten la energía solar incidente en energía química mediante el proceso de la fotosíntesis, este mecanismo permite la generación de biomasa vegetal, que luego se verá reflejada en los Índices de Vegetación. Los estudios de Tucker (Tucker, C., 1979) demuestran la relación existente entre la producción de biomasa y los índices verdes dejando demostrado la utilidad de los mismos.

El NDVI es definido entonces como:

$$\boxed{\text{NDVI} = \frac{\text{IR}-\text{R}}{\text{IR}+\text{R}}} \quad \text{o} \quad \boxed{\text{NDVI} = \frac{\text{ND}_{\text{IR}} - \text{ND}_{\text{R}}}{\text{ND}_{\text{IR}} + \text{ND}_{\text{R}}}}$$

Siendo ND los niveles digitales que varían de 0 a 255 (256 niveles), en escala de grises por cada banda. Los índices verdes pueden trabajarse con los ND (Niveles Digitales) o mediante el pasaje a la reflectancia cuando se quiera dar una variable física (Chuvieco, 1990).

La vegetación se comporta diferente a lo largo del año, acompañando los cambios en la temperatura, precipitación y horas de radiación. En períodos de escasez hídrica la producción de biomasa tiende a disminuir siendo menor que en los períodos húmedos (Aguado *et al*, 2001). Este hecho no se da por igual en todas las plantas, siendo los pastizales los que reflejan más claramente el fenómeno. En el caso de los matorrales, debido a que son más resistentes y no pierden tan fácilmente su contenido de humedad y verdor se espera que el comportamiento no sea tan marcado (Aguado *et al*, 2001). El contenido de humedad está correlacionado con el NDVI, al disminuir el contenido de humedad también lo hace el NDVI, siempre referido a períodos de tiempo corto (estaciones climáticas), dado que de mantenerse el cambio en el régimen hídrico se podría esperar un cambio en el tipo de vegetación y con esto un cambio en el NDVI más permanente (Aguado *et al*, 2001). El NDVI entonces permite asociar la vegetación a las variables meteorológicas y por tanto hacer análisis sobre la evolución de ambas variables.

Los sensores remotos, a través de las imágenes y datos generados constituyen una herramienta muy potente, que permiten generar bases de datos espaciales y temporales, haciendo posible la caracterización de la vegetación, determinar su evolución, establecer la relación con las variables meteorológicas, realizar modelos de predicción del comportamiento, establecer la existencia de perturbaciones, etc.

La teledetección, mediante el análisis de producción de biomasa, constituye un mecanismo para comprender el funcionamiento de cualquier ecosistema, tanto a nivel temporal como espacial. Mediante el uso de los ND, se puede establecer la existencia de distintas zonas que a primera vista resulten iguales. Es común realizar un análisis de la estructura vegetal, ya sea por análisis visual de imágenes, fotografías o en campo, lo que podría estar ocultando información. La teledetección, a través del análisis cuantitativo, permite identificar zonas según la producción de biomasa y por tanto identificar diferencias, que mediante el análisis visual no podrían ser resaltadas. Esta situación puede ser llevada a los humedales, en los que visualmente pueden identificarse áreas dominadas por una misma comunidad vegetal, que no parece tener diferencias internamente. La teledetección mediante los niveles digitales permite establecer si el funcionamiento, en cuanto a la producción de biomasa realmente es el mismo o no, permitiendo establecer diferencias dentro de grupos aparentemente homogéneos.

Así, la posibilidad de obtener imágenes en periodos de tiempo regulares permite analizar la evolución temporal que, mediante un relacionamiento con el clima, permite establecer

evoluciones conjuntas. Es así que la teledetección se presenta como un instrumento para realizar zonificaciones, conocer evoluciones y a partir de éstas establecer planes de monitoreo que permitan comprender las afectaciones que sufre la comunidad vegetal, ya sea por intervenciones antrópicas o cambios en el ambiente natural.

La teledetección se presenta entonces como una herramienta más, que aporta al conocimiento del funcionamiento de un ecosistema. En este contexto para la presente investigación servirá como insumo para conocer como se comporta espacialmente y temporalmente el humedal localizado al norte de la Laguna Negra, a través del análisis de la producción de biomasa. Generando de esta forma nuevo conocimiento en cuanto a su funcionamiento espacial y temporal del mismo, aportando insumos para la gestión y planificación del humedal.

Es así, que el trabajo presenta los siguientes objetivos:

1.3 Objetivos e hipótesis

1.3.1 Objetivo general

Evaluar las variaciones espaciales y temporales en el comportamiento productivo del humedal localizado al norte de la Laguna Negra, para el periodo comprendido entre abril de 1998 y agosto de 2009.

1.3.2. Objetivos específicos

- 1-Determinar los límites del humedal, a partir de información cartográfica preexistente (CONEAT, curvas de nivel y pendientes)
- 2-Identificar zonas con el mismo comportamiento productivo dentro del humedal, mediante el cálculo del NDVI.
- 3-Analizar las variaciones temporales de las zonas para el periodo considerado.
- 4-Evaluar el comportamiento productivo en función de las variables meteorológicas temperatura y precipitación, entre abril de 1998 y agosto de 2009.

1.3.3 Hipótesis

La identificación de zonas homogéneas, según las variaciones temporales en la producción de biomasa, dentro del humedal de Santa Teresa, pueden ser determinadas a partir de los valores de NDVI aportados por sensores remotos.

1.4 Área de estudio

1.4.1 Cuenca de la Laguna Negra

El área de estudio se localiza al este del departamento de Rocha-Uruguay entre las coordenadas 33° 54'23'' latitud norte, 33° 59'40'' latitud sur, 53° 44'32'' longitud oeste y 53° 32' 57'' longitud este.

Pertenece a la Microcuenca de la Laguna Negra integrada en la Cuenca Atlántica, en el límite con la Cuenca de la Laguna Merín, donde las divisorias entre una y otra son poco marcadas. Éste se emplaza frente al Parque Nacional Santa Teresa, en los denominados Bañados de Santa Teresa que se continúan hacia el norte uniéndose con los bañados de San Miguel y de las Maravillas. Las divisorias de aguas que dan límite a la cuenca de la Laguna Negra son al este la Cuchilla de Angostura, separando las aguas que drenan a la laguna y el océano. Hacia el norte se encuentra las Sierras de San Miguel, y al oeste las Sierras de Blanqueada y Cuchilla del Peñón (Figura 3A).

Los centros poblados más cercano al área son Balneario La Coronilla, Punta del Diablo, 18 de Julio, Chuy y Castillos. Su ingreso puede realizarse por las Ruta Nacionales N° 9 y N° 14 (Figura 3A).

Las actividades productivas en la cuenca son principalmente la ganadería y la agricultura arroceras. Las principales actividades pecuarias practicadas son la cría de ganado bovino y ovino, en general sobre pasturas naturales, pero se pueden observar algunas praderas artificiales. La agricultura es principalmente arroceras, en rotación con praderas para la cría de ganado. La agricultura de huerta, se vincula a las proximidades de los centros poblados de Castillos y Chuy. Es común en épocas estivales vinculado a la llegada del turismo la producción artesanal de quesos, licores y otros productos realizados por habitantes de la zona. El turismo es una actividad económica importante en el área, cada vez más cobran relevancia los balnearios próximos a la laguna, destacándose el fenómeno de Punta del Diablo que se ha consolidado en los últimos años como un importante centro turístico. La existencia de estos balnearios, próximos a la Laguna Negra y principalmente su cercanía con el Parque Nacional Santa Teresa, el cual alberga un interesante número de turistas, hacen que en épocas estivales la laguna sea un atractivo más para los veraneantes de la zona.

La cuenca de la laguna Negra está representada por tres grandes categorías ambientales, Tierras Altas, Tierras Bajas y el cuerpo de Agua correspondiente a la Laguna Negra. Estas son las que determinan los procesos geomorfológicos de erosión-transporte-sedimentación que dominan el área.

Las tierras altas comprenden áreas no inundables y están constituidas por sierras, lomadas, dunas y médanos (Figura 3B). Las sierras, localizadas al norte y centro-sur oeste de la cuenca, presentan una vegetación predominante de pradera estival asociada a un monte serrano denso en los interfluvios; acompañando las vía de drenaje se puede apreciar el monte galería poco denso. Las sierras son dominada por procesos erosivos, dónde las fuertes pendientes, los suelos predominantemente superficiales y el uso pastoril, favorecen el aporte de sedimentos hacia las Tierras Bajas que son transportados por aguas de escurrimiento superficial.

Las lomadas se encuentran en el centro de la cuenca al norte de la laguna, corresponden a litologías cristalinas que afloran entre las Tierras Bajas. Su vegetación es de pradera estival. Al igual que las sierras esta unidad constituye una fuente de sedimentos para el humedal, si bien presenta menores pendientes y suelos más profundos su fertilidad medianamente alta la ha convertido en una importante área agrícola, cuyas consecuencias resultan en un aumento en el aporte de sedimentos hacia el humedal.

Las dunas y médanos, se localizan en la faja costera sureste de la cuenca. Las pendientes indicarían que las arenas constituyentes del material edáfico, deberían aportar sedimentos arenosos a la laguna y los humedales, pero debido a la actividad forestal existente en el lugar, el aporte tendría que verse disminuido notablemente.

Las denominadas Tierras Bajas están formadas por humedales permanentes y semipermanentes, las cuales se localizan en cotas inferiores a los 20 msnm. (Figura 3B). La diferencia entre humedales permanentes y semipermanentes está dada por el régimen hídrico a los que son sometidos sus suelos y que condicionan las características de estas dos unidades.

Los humedales semipermanentes, ocupan un área importante en el norte y suroeste de la cuenca. Corresponden a suelos que permanecen inundados menos de 9 meses en el año, debido a las bajas pendientes que presentan (menos del 1%) y a los importantes aportes de agua que reciben de las Tierras altas. Estas condiciones geomorfológicas, hacen que se desarrollen suelos hidromórficos carentes de horizonte hístico, debido a la existencia de un periodo seco en el verano que permite la descomposición de la materia orgánica acumulada en las estaciones húmedas. Esta situación permite que prospere una vegetación de pradera estival a la que se asocian palmares *Butía capitata*. Estas últimas son de gran importancia debido al paisaje singular que representan y al desconocimiento en cuanto a sus orígenes y funcionamiento. Los humedales semipermanentes actualmente están siendo presionados por la agricultura arroceras debido a las actividades comunes de la agricultura y también por las obras hidráulicas que deben realizarse para el control de las aguas tanto para evacuarlas como para utilizarlas en épocas de escasez hídrica.

Los humedales permanentes ocupan áreas poco extensas bordeando la laguna, los de mayor tamaño se encuentran al norte de la misma, ocupan áreas donde las pendientes son del orden de 0 %. Sus suelos son hidromórficos, en los cuales el periodo de inundación es mayor a los 9 meses en el año. Estas condiciones hacen que la materia orgánica, producto de la vegetación hidrófila predominante, sea descompuesta muy lentamente en condiciones de carencia de oxígeno. Esta unidad presenta microrelieve donde los suelos no están encharcados y crece vegetación de pradera.

Los humedales de la Laguna Negra corresponden a la categoría K: Lagunas costeras de agua dulce, de la Clasificación Ramsar (Anexo 1).

La actividad arrocera en el área se desarrolla principalmente al norte de la cuenca en suelos de planicie, y sus impactos se dan por la pérdida de biodiversidad al remplazarse la cobertura vegetal. La pérdida de hábitats, generación de suelo de arado en los suelos donde los cultivos se dan por largos períodos, disminución de la porosidad natural de los suelos y aumento en la velocidad de infiltración son otros impactos que pueden observarse (Duran *et al*, 1998). Por otra parte, la aplicación de fertilizantes los cuales son aplicados en más del 90 % de las superficies cultivadas del país, así como herbicidas aplicados entre un 60 y 70% y funguicidas entre un 25 y 30% (Deambrosi, 1996) podrían estar generando serios conflictos ambientales, aunque se desconocen los efectos de estos en los cuerpos de aguas que dominan el área. Asimismo, las actividades agrícolas desarrolladas en zonas de mayor altura y pendiente, como sucede en las lomadas, podrían hacer llegar mayores volúmenes de sedimentos a los humedales, acelerando los procesos de colmatación. Éstos sedimentos, dependiendo del tipo de manejo que se este realizando, pueden importar grandes cantidades de energía en forma de nutrientes que llegan adheridos a los sedimentos. Pero debe decirse que no reconocen estudios en el área que hayan evaluado estas posibilidades aunque las probabilidades de que esto este sucediendo son altas debido al intenso uso agrícola que domina el área.

En cuanto a las perturbaciones que han sufrido los humedales debido a las obras de drenaje, son importantes. Los proyectos para la desecación o aumento de la productividad de “tierras infértiles”, como eran consideradas antiguamente, datan del final del siglo XIX, cuando se da el interés por la desecación de los bañados de Rocha para convertirlos en praderas productivas y finalizan en el siglo XX.

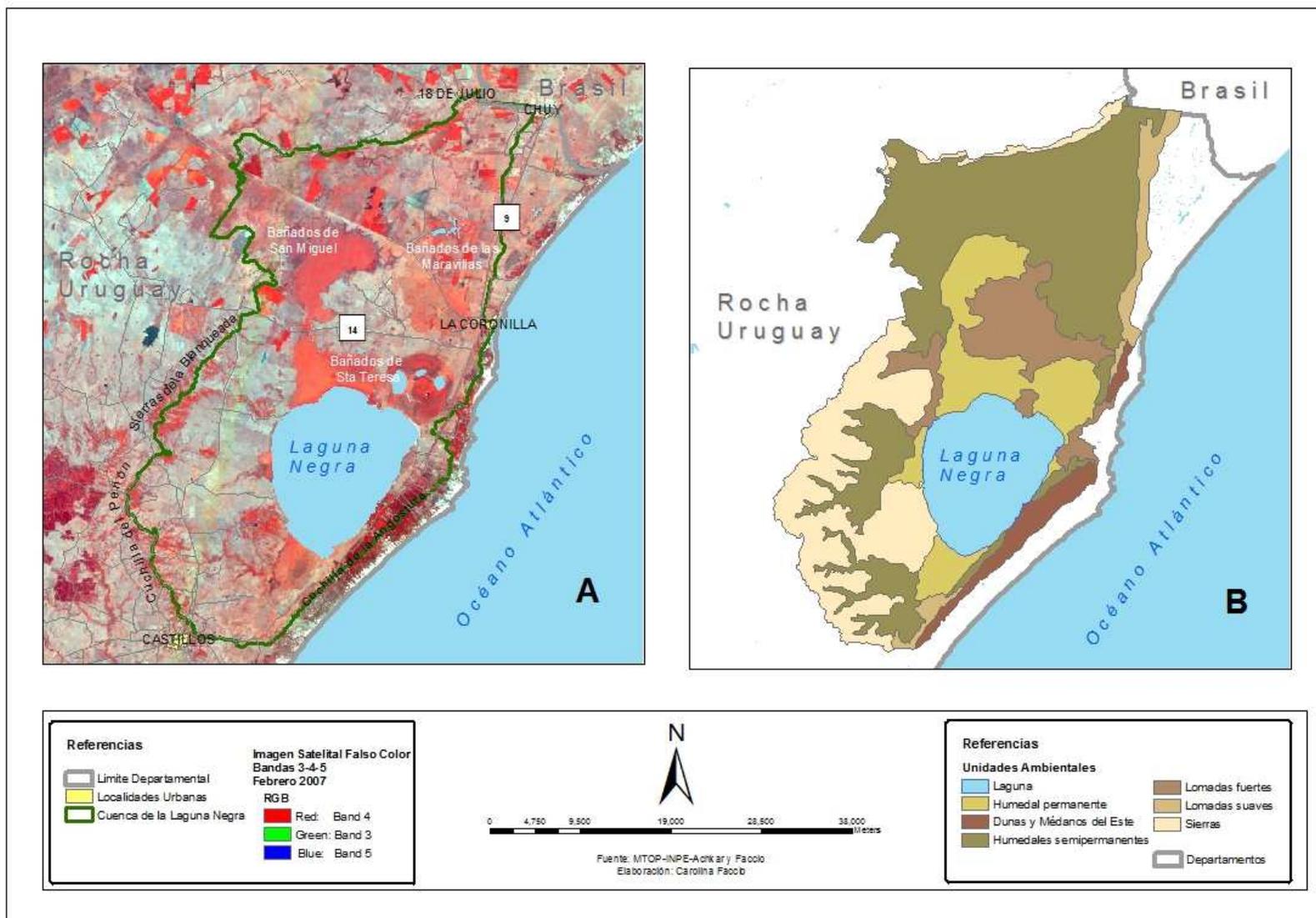


Figura 2. A. Cuenca de Laguna Negra, B. Unidades Ambientales en la Cuenca de Laguna Negra

1.4.2 Humedales del Noreste de la Laguna Negra

La presente investigación se realizó en los humedales del norte de la Laguna Negra (figura 4). El área presenta las características de los humedales permanentes, con suelos hidromórficos de tipo Histosoles y Gleysoles y vegetación hidrófila.

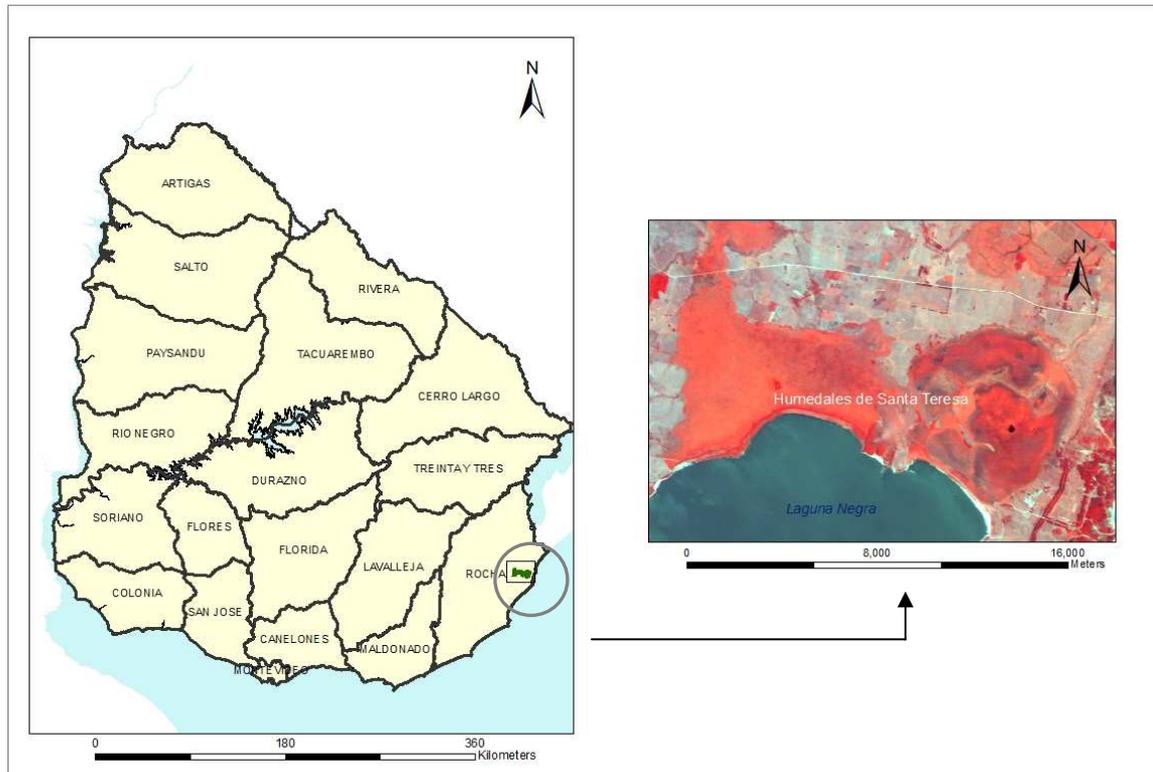


Figura 3. Localización del área de estudio.

Los primeros se caracterizan por estar inundados gran parte del año y por presentar materia orgánica parcialmente descompuesta que ocurre en altos porcentajes (dependiendo del contenido de arcilla se considera entre un 20 y un 50 % de materia orgánica en el horizonte diagnóstico superficial hístico), en los segundos existe una napa próxima a la superficie que desciende en los períodos de déficit hídrico, condicionando la colonización por parte de especies no adaptadas a los ambientes hídricos (MGAP, 1976).

En cuanto a la flora y fauna, nos basaremos en la información recopilada por Probides para la estación biológica Potrerillo de Santa Teresa. Estos hacen referencia a 2 tipologías de humedales el turboso y no turboso, y aparte una zona de borde de bañado. El primero, presenta una riqueza de especies baja, dónde se consideran a *Scirpus giganteus* y *Zizaniopsis bonariensis* como especies emergentes dominantes. En cuanto a las especies de plantas flotantes, desarrolladas en pequeños parches, aparecen el *Salvinia auriculata*,

Schizachyrium microstachyum, *Lemna spp.* y *Azolla spp.* y *Polygonum punctatum*. En el segundo tipo de humedal se da la disminución en la cobertura de *Scirpus giganteus*, aunque continua siendo la dominante, y aparecen los *Juncus imbricatu* y *Scirpus californicus*, también lo hace *Cephalanthus glabratus* entre otros (Alonso y Molina, 1996). Debe destacarse que en el área existe una diversidad de plantas que son consideradas por el SNAP, como prioritarias para la conservación.

En cuanto a la fauna existen distintas especies de mamíferos, *Hydrochoerus hydrochaeris*, *Myocastor coypus* (capturada para extraer su piel), ratas y ratones de campo, todos ellos herbívoros, estos pueden servir como indicadores de perturbación de un humedal y como soporte de redes alimentarias, dado que son el alimento de especies carnívoras como *Lutra longicaudis* y *Sus scrofa*, encontrados en el área (Fernández, *et al*, 1995). Algunos anfibios transfieren energía desde el medio acuático al medio terrestre, dado que pasan sus primeros estadios de vida en el agua y luego pasan al medio terrestre formado parte de esta red trófica (Forni, *et al*, 1995). De un total de 39 anfibios encontrados en Uruguay 27 existen en estos humedales, y de un total nacional de 61 reptiles se encontraron 32, lo que muestra la importancia desde el punto de vista de la biodiversidad (Forni, *et al*, 1995). Mantener estas especies permite el control biológico natural de especies, como es el caso de determinados insectos de los que se alimentan los anfibios (Forni, *et al*, 1995). Con los reptiles sucede lo mismo, forman parte de una red trófica y por tanto controlan ciertas poblaciones de otras especies, principalmente tetrápodos (Forni, *et al*, 1995).

Los humedales de la estación biológica Potrerillo albergan un 36% de las especies de aves presentes en nuestro país, las cuales utilizan este ambiente con distintos fines. Muchas dependen completamente de los humedales para alimentarse dado que consumen organismos que se encuentran en ambientes de agua dulce y en tierras de humedales. En cuanto al refugio, los humedales proveen de materiales a algunas aves para la construcción de sus nidos y a veces utilizan los pajonales como soporte de los mismos; asimismo existen otras especies que los usan en épocas de nidificación (Retamosa *et al*, 1996). Todos estos elementos dejan claro el importante rol que juegan los humedales en la estructuración de todo el ecosistema, mediante el aporte de hábitat y recursos para distintas especies de animales y vegetales.

Desde lo geomorfológico, pueden distinguirse 2 tipos de humedales, por un lado se encuentran los humedales del noreste y por otro del noroeste.

Los primeros se encuentran bordeados por rocas cristalinas de mayor altura y pendientes que actúan como barreras impidiendo la expansión del mismo cuando las condiciones meteorológicas lo determinaran. Esto se podría traducir en un aumento en el nivel de las aguas generando un ambiente más húmedo. En el segundo caso existen rocas cristalinas y sedimentarias que mantienen las condiciones hídricas del humedal, sin embargo su

conexión con los humedales del norte, en los que la litología no provoca cambios importantes en las pendientes y alturas, podrían permitir una circulación de las aguas. Mediante este parche de humedal se da la conexión directa con el resto de los humedales permanentes y semipermanentes del norte.

En los humedales del noreste se pueden distinguir zonas con distinto tipo de vegetación, ésta pasa, en un nivel general, de pajonales a pastizales existiendo también pequeños parches de bosque nativo lo que estaría reflejando la variedad en las características hidrológicas y edafológicas. Bordeando el humedal existe una pequeña faja de vegetación de tipo pastizal y en la zona central se da una vegetación de pajonales.

En su centro existen tres pequeñas lagunas denominadas Blanca, Verde y del Bicho y es atravesado por un canal artificial que evacua las aguas de la laguna y de los humedales hacia el Océano Atlántico a la altura del balneario La Coronilla.

Los cambios hidrológicos pueden traducirse en una transformación de la biodiversidad asociada, que se puede detectar a nivel paisajístico a través del estudio temporal de los cambios en la distribución y extensión cubierta por las diversas formaciones vegetales.

Este fragmento del humedal se encuentra rodeado por las lomadas existentes producto del afloramiento de rocas cristalinas, exceptuando en el sur en donde presenta contacto directo con las aguas de la laguna. Esta situación espacial hace que el mismo reciba directamente los sedimentos provenientes de las lomadas que se localizan al este. La intensa actividad agrícola de las lomadas podría provocar un aumento de la cantidad de sedimentos que le llegan al humedal, acelerando los procesos de colmatación y consecuentemente aumentando su nivel altimétrico, disminuyendo de esta forma la capacidad de retención de aguas y el material transportado en suspensión.

Este humedal estaría cumpliendo la función de purificación de las aguas que llegan desde las lomadas cargadas de agroquímicos haciendo que las aguas lleguen más limpias y claras a la laguna y el océano.

Las actividades de desecación de los humedales han perturbado toda la cuenca, pero la existencia de canales que atraviesan el humedal permiten la descarga de las aguas de escurrimiento superficial directamente al canal, limitando sus funciones.

El humedal del noroeste no se encuentra perturbado como el anterior, en este no existen obras de canalización que provoquen efectos directos en la hidrología del área, aunque si puede observarse que las tierras altas de sus alrededores se encuentran intensamente cultivadas principalmente en la zona de lomadas. En el caso de las sierras localizadas en su borde oeste la actividad desarrollada es la ganadería, actividad que representa una amenaza menor debido a la poca intervención a la que están sometidos sus suelos.

Cabe destacar que en las lomadas localizadas en el noroeste se encuentra la Estación Biológica Potrerillo de Santa Teresa, un área protegida, donde se desarrollan investigaciones para conocer los diferentes ecosistemas del área.

2. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el presente trabajo fue necesario previamente generar un Sistema de Información Geográfica (SIG). Es decir un sistema de almacenamiento y tratamiento de datos geográficos (Delgado y Eyji, 1998), que utiliza herramientas informáticas para la incorporación, integración, creación y modificación de información, la cual es obtenida en diferentes formatos y sistemas de referencia (Peña, 2008). Utiliza capas gráficas que se encuentran asociadas a sus atributos, mediante tablas, en las que cada columna corresponde a un atributo o variable (Peña, 2008). Esta particularidad de utilizar tablas, hace posible la aplicación de la estadística a los componentes gráficos de cada capa, facilitando los análisis espaciales.

El software utilizado fue el ArcGIS 9.2 de ESRI, a través del cual se pudo ingresar la cartografía recopilada que presentaba distintos formatos, escalas y sistemas de referencia. Luego de llevar toda la cartografía e imágenes a un mismo sistema de referencia, se obtuvo la base de datos geográfica conteniendo imágenes y capas de información grafica, todas representadas en el sistema de referencia local Yacaré¹. Dicha base fue utilizada a lo largo de todo el trabajo para la generación y análisis de los resultados.

Una vez que la cartografía quedó lista, se estuvo en condiciones de realizar una serie de etapas metodológicas que permitieron cumplir con los objetivos planteados, el primer paso fue la delimitación del humedal. Una vez determinado, se realizó la zonificación, la cual se llevo a cabo según resolución espacial y temporal. Con una imagen Landsat 5 TM de alta resolución, del 11 de setiembre de 2009, N° LANDSAT_5_TM_20090911_222_084_L2, resolución espacial de 30 metros, falso color, combinación de bandas 3, 4 y 5 correspondientes a las bandas rojo (0,63 - 0,69 micrómetros), banda 4 infrarrojo cercano (0,76-0,90 micrómetros) y banda 5 Infrarrojo medio (1,55 - 1,75 micrómetros), obtenida a través del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) de Brasil, se generó una primera zonificación de detalle, para la fecha de setiembre de 2009, que permitió una mejor comprensión de los componentes del humedal. Seguidamente se procedió a una zonificación con alta resolución temporal, para lo cual se utilizaron 411 imágenes SPOT VGT, 3 imágenes por mes para el periodo de abril de 1998 a setiembre de 2009. Dichas

¹ Elipsoide de Hayford 1909 (internacional 1924), Proyección Gauss, el Meridiano de contacto corresponde al 62° con origen de la cuadrícula Xo= 500 km. al oeste del meridiano 62°, Yo = Polo Sur.

imágenes presentaban una baja resolución espacial de 1 Km. A partir de esta información, y luego de ser comparada con los datos de alta resolución espacial, se llevaron a cabo procedimientos estadísticos, que permitieron determinar si las zonas generadas eran adecuadas. Finalmente se procedió a un análisis cualitativo de la evolución temporal del NDVI para las distintas zonas, buscando obtener una aproximación sobre el comportamiento en el tiempo de las distintas zonas establecidas y se realizó un análisis de la relación temporal entre el NDVI y las variables meteorológicas temperatura y precipitación.

2.1 Delimitación del área

La delimitación del área fue realizada tomando como base los grupos de suelos CONEAT², cuya escala es 1:20.000. Esta decisión se tomó debido a que los suelos constituyen un subsistema resultante de la interacción de los subsistemas agua, vegetación, geología, relieve, clima, y por tanto son buenos indicadores de la presencia de un determinado ecosistema.

Los grupos de suelo CONEAT brindan información sobre las características de los suelos y su entorno. En estos puede identificarse aquellos suelos clasificados como hidromórficos, lo que constituye una característica fundamental para establecer la presencia de un humedal. Es así que a partir de la identificación de estos suelos se procedió a establecer un primer límite base, a partir del cual se comenzó a trabajar. A este nuevo límite fue superpuesta la imagen satelital Landsat 5 TM, con 30 metros de resolución, de setiembre de 2009, se tomó esta fecha por ser la más próxima al inicio de la investigación. Mediante su interpretación fueron establecidas diferencias en la cobertura vegetal y en las formas del relieve, llevando a un ajuste en los límites.

Posteriormente se incorporó información sobre pendientes, utilizando una capa extraída de un Modelo Digital de Terreno (NASA), con resolución de 90 metros, lo que permitió identificar áreas que presentan pendientes altas y bajas, y establecer posibles zonas donde existen condiciones para que se de un escurrimiento superficial y aquellas en que el agua podría permanecer encharcada por largos periodos de tiempo. Asociado a esto último y con el objetivo de conseguir una mejor comprensión del funcionamiento hidrológico del área, se incluyeron las curvas de nivel, del MTOP, escala 1:50.0000, que permitieron aproximarse al nivel altimétrico del área.

² CONEAT: constituye una clasificación de los suelos según productividad de carne y lana en pie, lo que está determinado por un conjunto de características de los propios suelos (drenaje, texturas, etc.) y sus entornos (geomorfología, geología, pendientes, etc.).

2.2 Zonificación del humedal

2.2.1 Zonificación de los humedales a escala de detalle

La zonificación de los humedales se realizó utilizando la imagen Landsat 5 TM del 11 de setiembre de 2009. La misma fue utilizada como base para la generación del NDVI de la imagen, a partir del cual se procedió a su clasificación. Para el cálculo de NDVI se recurrió al software Arc View 3.2 con la extensión Image Análisis, utilizando las bandas 3 (R) y 4 (IR) y luego se procedió a la clasificación no supervisada en 10 clases.

2.2.2 Zonificación según resolución temporal

2.2.2.1 Preparación de los datos SPOT

Para determinar la zonificación del humedal con una alta resolución temporal, se utilizaron imágenes SPOT VGT S10, formato HDF del Programme Vegetation. Fueron adquiridas imágenes síntesis del NDVI cada de 10 días, por lo que fueron obtenidas 3 imágenes por mes, para un periodo de 11 años y 4 meses, desde abril del 1998 hasta agosto de 2009, obteniéndose un total de 411 imágenes.

Dado que el formato, HDF, no puede ser levantado por el software ArcGis 9.2, mediante el cual se iba a realizar el tratamiento de los datos, fue precisa la transformación de cada imagen a formato TIFF, para lo cual se utilizó el software ENVI 4.4.

Posteriormente se procedió a georreferenciar cada una de las imágenes en el sistema de referencia local Yacaré, de forma que fueran compatibles con el resto de la información cartográfica. La georreferenciación se realizó con alta precisión, de manera que los píxeles coincidieran en las 411 imágenes a ser trabajadas. Para esto, se realizó una primera máscara a cada imagen utilizando un cuadro para disminuir el tamaño de la imagen (dado que las mismas son provistas para toda América del Sur) y conseguir límites precisos (Figura 4, Mapa 1). De esta forma los puntos ha georreferenciar (los mismos para todas las imágenes) eran fácilmente identificables (Figura 4 Mapa 2). Finalmente utilizando una cobertura (capa de información cartográfica) del MTOP que contenía el contorno de Uruguay, se realizó una segunda máscara obteniendo únicamente la imagen de Uruguay, donde los píxeles de cada una de las imágenes coinciden (Figura 4, Mapa 3).

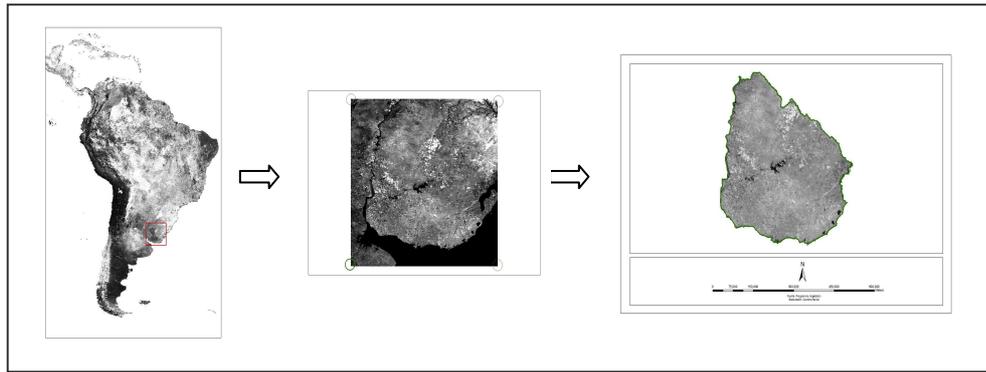


Figura 4. Procedimiento para georreferenciar las 411 imágenes SPOT VGT. El mapa 1 muestra la imagen original obtenida para toda América del Sur, el cuadro rojo constituye la máscara aplicada para disminuir el tamaño de la imagen. El mapa 2 corresponde al área obtenida luego de la aplicarse la máscara, los círculos en verde identifican los extremos utilizados para la georreferenciación. El Mapa 3 muestra la imagen obtenida luego de ser georreferenciada y de aplicársele una máscara con el contorno de Uruguay (contorno en verde).

Luego se creó una grilla de polígonos, en la que cada polígono correspondió a un píxel. A partir de éste, mediante la generación del centroide a cada polígono, se creó una nueva capa de puntos donde cada uno de ellos correspondió al centroide de un píxel. Esto permitió el pasaje de la información tabular de los ND de cada píxel (usando una herramienta de relación espacial) y de cada imagen, a su punto correspondiente (Figura 5). De esta forma se obtuvieron 2 capas de información, una con la grilla, y otra de puntos (centroides) que contenía la información de cada una de las imágenes píxel a píxel. Finalmente se procedió a realizar el pasaje de la información contenida en la capa de puntos a la capa de la grilla, llegando así a una capa vectorial final, que representa cada uno de los píxeles y que contiene en formato tabular, toda la información temporal de cada uno de los píxeles.

Posteriormente se extrajo de la capa que contenía el gráfico de Uruguay el área con el límite del humedal. Finalmente se eliminaron todos aquellos píxeles que tomaban parte de zonas altas, con el fin de no introducir errores debido a la simplificación que realizan los detectores cuando registran reflectancias de superficies.

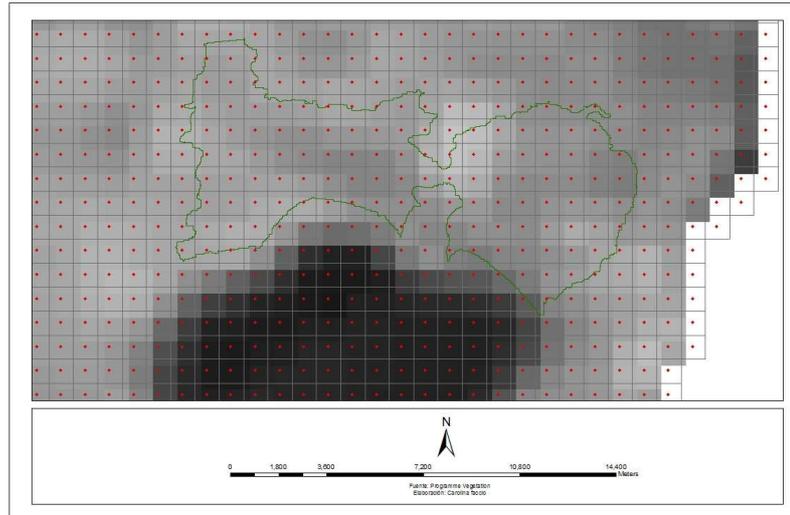


Figura 5. En color rojo quedan representados los centroides generados que permitieron pasar la información de las imágenes a la grilla. En color gris se muestra la grilla a la cual se paso la información. En color verde se presenta el área de estudio.

2.2.2.2 Zonificación

Una vez obtenidos los límites del área y de haber seleccionado los píxeles a ser utilizados se procedió a realizar un Análisis de Componentes Principales (ACP), con el objetivo de conocer si existían píxeles que presentaban comportamiento similar con respecto a la variable tiempo.

El ACP es un método exploratorio que permite disminuir el número de variables perdiendo la menor cantidad de información posible. Es decir simplifica el número de variables a través de la generación de nuevas, denominadas factores, que resultan de la combinación lineal de las anteriores. La utilidad del análisis viene dada por la existencia de una importante correlación entre las variables, que se traduce en una redundancia de los datos, que pueden ser simplificados en un menor número de variables que guardan relación con las originales.

Los nuevos factores síntesis que se obtienen, explican en distinta proporción la variabilidad de todo el sistema, siendo el factor 1 el que explica la mayor variabilidad (en porcentajes), el 2 el que tiene la mayor proporción luego del 1 y así sucesivamente. En el análisis se establece el número de factores a tener en cuenta, lo que resulta del porcentaje de variabilidad acumulado.

Finalmente se procedió a un análisis cualitativo que permitió agrupar los píxeles según su comportamiento con respecto a los factores seleccionados. Los resultados fueron luego

llevados a una capa de información dentro del SIG y se establecieron zonas con igual comportamiento dentro del humedal.

2.2.2.3 Estudio estadístico de los resultados obtenidos a partir del ACP

El ACP permitió establecer la existencia de zonas dentro del humedal, según el comportamiento del NDVI en el tiempo. Dado que los componentes principales constituyen una técnica exploratoria de los datos, se debió probar si estadísticamente las zonas obtenidas verificaban o rechazaban las hipótesis de que estas podrían ser consideradas como distintas poblaciones de píxeles o no.

Para las pruebas estadísticas se utilizaron el test paramétrico ANOVA de una vía y el test Kuskal-Wallis en los casos de las no paramétricas. Ambos constituyen test estadísticos para comparar si dos o más grupos de casos provienen de la misma población (Pérez, 2004). El primero es utilizado para comparar las medias de dos o más poblaciones, siempre que las muestras cumplan con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza (StatSoft, Inc., 2004). El segundo es utilizado para conocer la probabilidad de que las muestras provengan de poblaciones con la misma distribución, cuando no se cumple con los supuestos mencionados (Pérez, 2004).

Para conocer qué test había de utilizarse previamente se realizaron las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene las cuales determinan la normalidad y homogeneidad de varianza respectivamente. Para el test ANOVA también se realizó la comparación Post Hoc que permite conocer las diferencias entre todos los grupos (StatSoft, Inc., 2004).

2.4 Análisis del Comportamiento temporal del NDVI

Una vez que fueron definidas las zonas y subzonas dentro del humedal, se avanzó en conocer el comportamiento que éstas han experimentado en el periodo de abril de 1998 a setiembre de 2009, teniendo en cuenta la variación en las componentes meteorológicas temperatura y precipitación.

Lo primero que se analizó, fue la variación del NDVI de forma independiente. Dada la variabilidad del NDVI en el tiempo, se optó por utilizar una curva exponencial negativa suavizada. Ésta es la curva que mejor se ajusta a las necesidades del trabajo y al tipo de datos a ser analizados, ya que destaca la existencia de ciclos más allá de los anuales normales, es decir la tendencia en periodos que superan el año. Esto se debe a que en una curva exponencial negativa la influencia de los puntos individuales decrece exponencialmente con la distancia horizontal desde los respectivos puntos de la curva,

sesgando los efectos de aquellos puntos más distantes, pero teniéndolos en cuenta (StatSoft, 2004).

Para analizar la variación del NDVI en el tiempo según las variables meteorológicas, fueron utilizados los datos de las estaciones más próximas al área, que corresponden a las de Rocha y Treinta y tres. Se efectuaron los cálculos de las medias de temperatura y precipitación de estas estaciones, debido a que el área de estudio se localiza entre ellas y se asume por tanto la existencia de un gradiente en las condiciones meteorológicas entre ambas estaciones.

Posteriormente se procedió a un análisis de correlación, es decir analizar la relación existente entre el NDVI, temperatura y precipitación, con el fin de evaluar si la modificación de una es acompañada por la modificación de la otra, buscando dar una explicación a las variaciones de NDVI, esto fundamentado en que la vegetación es dependiente de las condiciones climáticas.

Para esto se utilizó el coeficiente de correlación de Person (r) para el caso de las paramétricas y el de Spearman para las no paramétricas, el cual mide la relación entre las variables según una relación denominada regresión lineal. El valor de r resultante varía entre -1 y 1, el valor -1 indica una correlación negativa perfecta, el valor 1 indica una correlación positiva perfecta y un valor 0 indica ausencia de correlación (StatSoft, 2004).

3. RESULTADOS

3.1 Delimitación del área

La primera delimitación del área estuvo determinada por el grupo de suelos CONEAT 3.13 (suelos hidromórficos). La superposición de la imagen Landsat 5 TM mostró una clara diferenciación entre las áreas de humedal y el resto de las tierras altas. No obstante dejó expuesta la existencia de un desplazamiento espacial de la capa CONEAT con respecto al resto de la información (Figura 6). Esto generó que dentro de los límites del humedal se incluyan píxeles de la imagen correspondientes a tierras altas y se excluyan píxeles que si pertenecen al mismo. Esta situación podría aportar errores en los análisis debido a que las reflectancias de zonas altas difieren con los de las zonas de humedales.

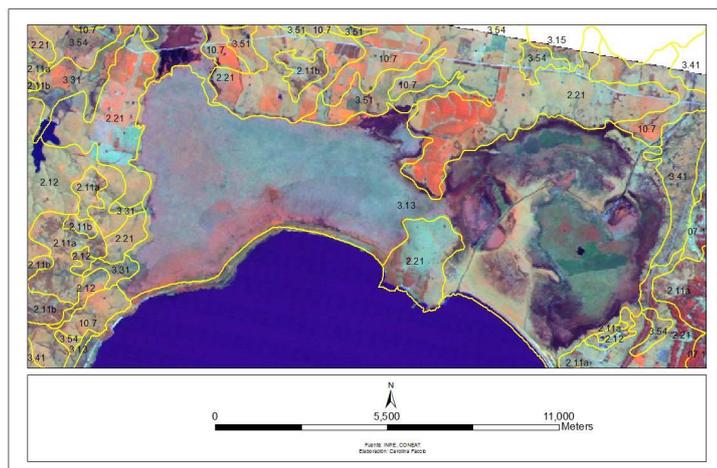


Figura 6. Corrimiento entre el CONEAT y la imagen satelital.

Este problema fue resuelto, generando un buffer (zona alrededor del área medida en metros) de 500 metros entorno al área CONEAT, con el que se logró incrementar el área más allá del los limites del grupo 3.13, lo que permitió identificar, mediante interpretación de la imagen, píxeles que no pertenecía al área, incluyendo aquellos que debido al buffer formaban parte del agua. Estos píxeles identificados fueron eliminados. Para fortalecer este análisis se recurrió a la capa de pendientes, derivada de un modelo digital de terreno (NASA), el cual permitió conocer las diferencias en la elevación del terreno, y por tanto identificar zonas dónde podrían mantenerse estancadas las aguas y establecer posibles direcciones en que se dan los flujos. Las curvas de nivel fueron superpuestas a la capa que iba siendo modificada, apoyando la clasificación generada hasta el momento (Figura 7).

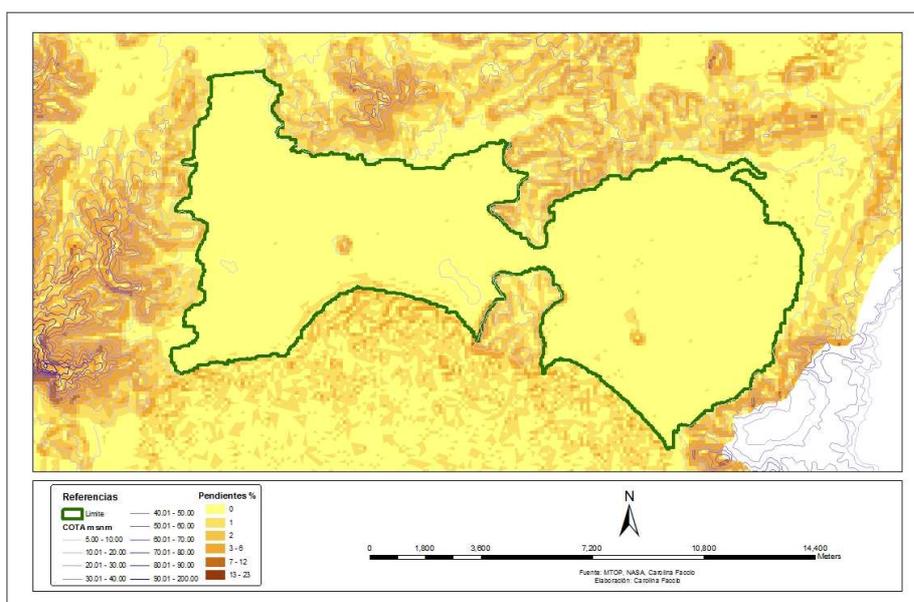


Figura 7. Límite del área, pendientes y curvas de nivel.

Por otra parte, dado que los humedales de Santa teresa se continúan hacia el norte con los bañados de San Miguel, se debió establecer un límite entre ambos. Para lo cual se optó por utilizar la ruta N° 14 donde el humedal presenta su zona más estrecha (Figura 8).

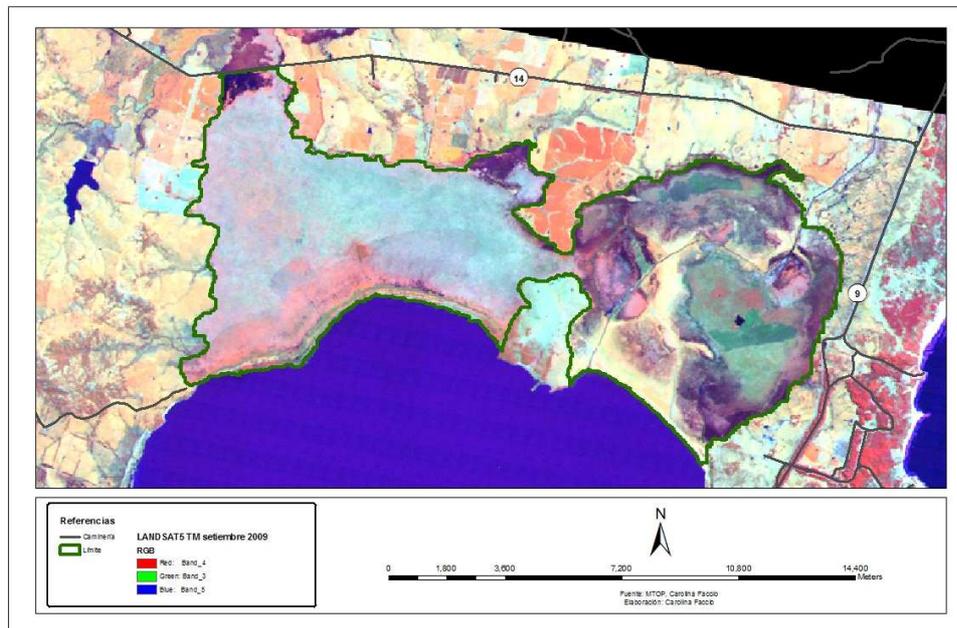


Figura 8. Límite del área.

El área delimitada presenta una superficie total de 84,16 km² (Figura 8). Quedando dominada por el grupo CONEAT 3.13, correspondiente a suelos Histosoles y Gleysoles. Prácticamente toda el área queda dominada por pendientes de 0%, identificándose dos pequeñas áreas donde oscilan entre 1 y 3 % (Figura 7). El nivel altimétrico es inferior al 10 msnm, alcanzando en algunas pequeñas áreas los 10 msnm (Figura 7). Exceptuando el borde norte, donde se continúa el humedal con los bañados de San Miguel, toda el área se encuentra rodeada por alturas que superan los 10 msnm, y donde las curvas tienden a estar más cercanas unas de otras, confirmando la existencia de pendientes mayores, que superan el 3 %. Acompañando estas características los suelos también cambian, pasando a observarse suelos con mejores drenajes.

3.2 Zonificación a escala de detalle

Del cálculo del NDVI para la imagen de setiembre de 2009 surgieron 5 clases dentro del humedal, que van desde una producción de biomasa muy baja a casi nula a una muy alta (Tabla 3). Las clases fueron generadas a partir del análisis cualitativo, donde se establecieron aquellas que generaban una mejor discriminación de las zonas.

Tabla 3. Clases obtenidas a partir de la clasificación del NDVI de la imagen satelital Landsat 5 TM de setiembre de 2009

RANGOS DE NDVI	CLASE	SUPERFICIE TOTAL OCUPADA POR LA CLASE KM ²	% DE LA SUPERFICIE OCUPADA POR CADA CLASE
<0	Muy baja	0.27	0.3
0.001-0.161	Baja	2.07	2.5
0.162-0.367	Media	41.39	49.2
0.368-0.562	Alta	38.96	46.3
>0.563	Muy alta	1.47	1.7
	Área total	84.16	100

Para setiembre de 2009, las clases que presentan mayor superficie fueron la media y la alta, ambas representan más de un 95% del área (Tabla 3), cubriendo casi la totalidad del humedal (Figura 9). Las menores productividades se registran en el este del humedal, mientras que las mayores se encuentran concentradas en pequeñas áreas localizadas en el sur, próximo a la laguna, y en el centro-este.

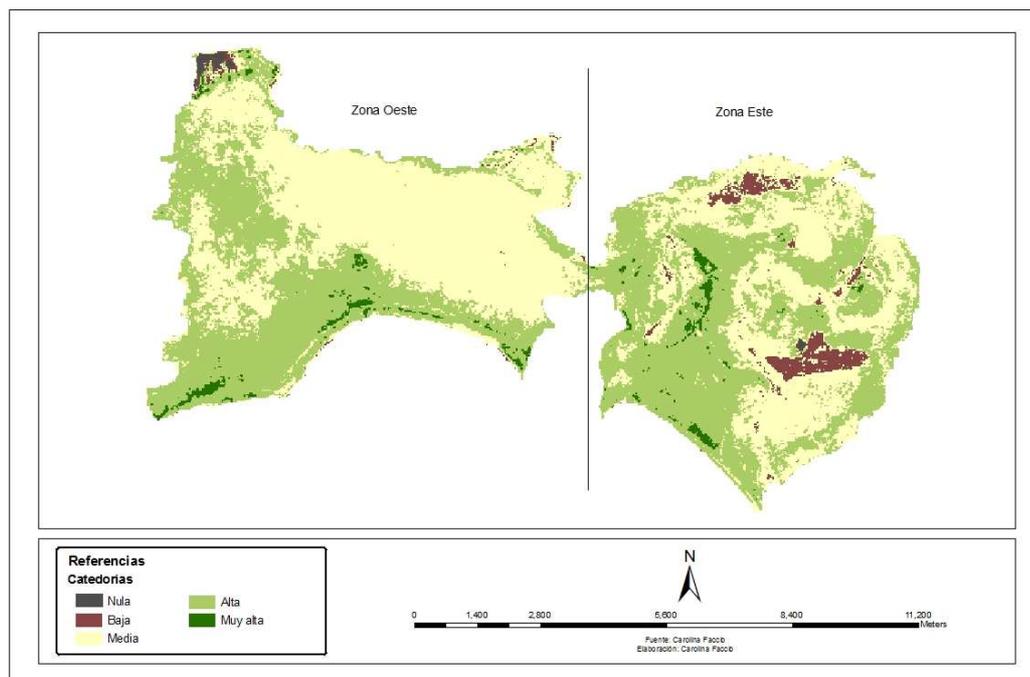


Figura 9. Zonificación del humedal, a partir del NDVI calculado para la imagen Landsat 5 de TM setiembre de 2009.

Hacia el oeste existe un claro patrón espacial en la productividad de biomasa, presentando una productividad media hacia el centro-oeste y noreste, que aumenta hacia sur y suroeste, donde se registran productividades altas. Hacia el noroeste se da una mayor

heterogeneidad, donde la productividad varía de nula o baja a productividades altas y muy altas.

En el este, sin embargo, se distingue una mayor variabilidad espacial, existiendo en el centro una faja de productividad alta que va disminuyendo hacia el norte y este, donde se registran dos parches de productividad baja.

De esta manera, fueron identificadas dos áreas dentro del humedal con comportamiento diferente en cuanto al NDVI, las zona Este y zona Oeste. Las mismas se encuentran separadas por parches de tierras altas que emergen en el humedal, y su principal diferencia esta dada por la heterogeneidad espacial que presentan, en este sentido se determinó que la zona Este presentaba una mayor heterogeneidad que la Oeste (Figura 9).

3.3 Zonificación según resolución temporal

3.3.1 Preparación de los datos SPOT

De los procedimientos realizados se obtuvieron un total de 411 registros de NDVI, por cada píxel. Los cuales quedaron incluidos en una capa de información poligonal, donde cada polígono representa un píxel.

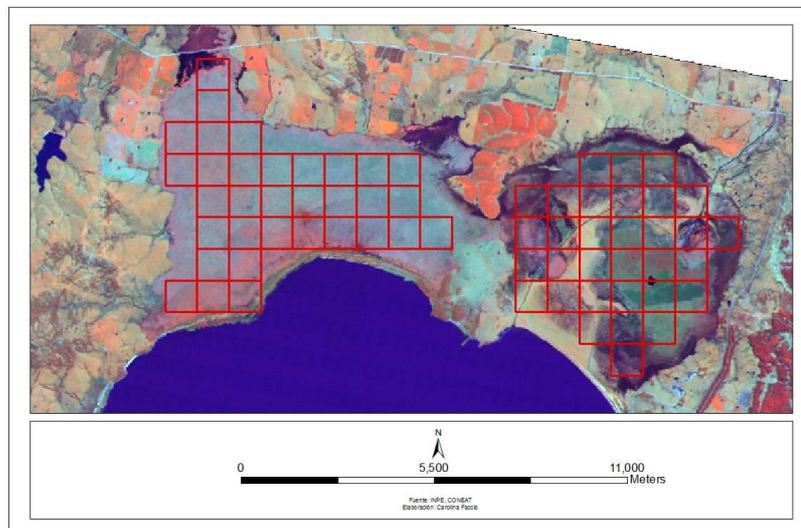


Figura 10. Píxeles seleccionados para realizar la zonificación temporal.

Los píxeles a ser utilizados en el estudio debieron ser seleccionados, ya que muchos presentaban parte de su superficie fuera del humedal, quedando un total de 65 píxeles íntegramente comprendidos en el área (Figura 10). Dado que en la zona centro del humedal se localizan tierras de mayores alturas y pendientes, debieron ser excluidos los que allí se ubicaban. El humedal quedó así separado en dos grupos, uno localizado al este y otro al

oeste. El primer grupo quedo conformado por un total de 32 píxeles y el segundo por 33 píxeles.

Dado que el total de registros obtenidos fue alto, 411 para cada píxel, se consideró que 3 datos al mes no aportarían mayor información y generarían complejidad al momento del análisis, por tanto se optó por disminuir el numero de variables, mediante la generación de medias mensuales. De esta forma se obtuvo un valor mensual por píxel, que finalmente se tradujo en un total de 137 observaciones para cada uno de los 65 píxeles.

3.3.2 Zonificación

Del ACP realizado se desprende que la máxima variación del sistema es explicada por factor 1 con un 42.24 % de la variabilidad total, seguido por el factor 2 que explica el 13,8 %. Siendo la variabilidad acumulada entre ambos de un 56.12 % del total (Tabla 4).

Tabla 4. ACP. Porcentaje de variabilidad según factores.

FACTOR	% TOTAL	CUMULATIVE
1	42.24744	42.2474
2	13.87765	56.1251

Del estudio de la relación de los factores con los píxeles, y del análisis de la relación espacial entre estos últimos, se determinó la existencia de dos conjuntos de píxeles, uno que se relaciona positivamente con el factor 1 y otro que lo hace negativamente. Al llevarse los datos al SIG pudo observarse que el grupo de píxeles con relación positiva correspondía a todos aquellos que se localizaban al oeste, y los que presentaban relación negativa se ubicaban al este (Gráfico 2). Es así que los píxeles fueron agrupados en dos zonas que se denominaron zona Este y zona Oeste (Figura 11).

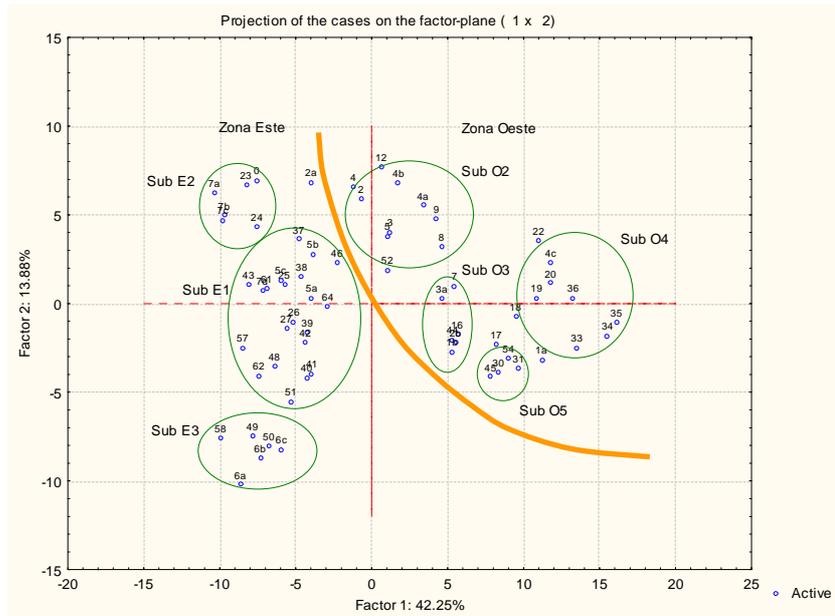


Gráfico 2. Resultados del ACP realizado a los píxeles pertenecientes a los Humedales de Santa Teresa, en donde se grafican píxeles según su relación con los factores 1 y 2. Zonas y subzonas obtenidas. En verde se representan las subzonas y en amarillo el limite entre las subzonas Este y Oeste. En azul se indican los píxeles con sus respectivos nombres.

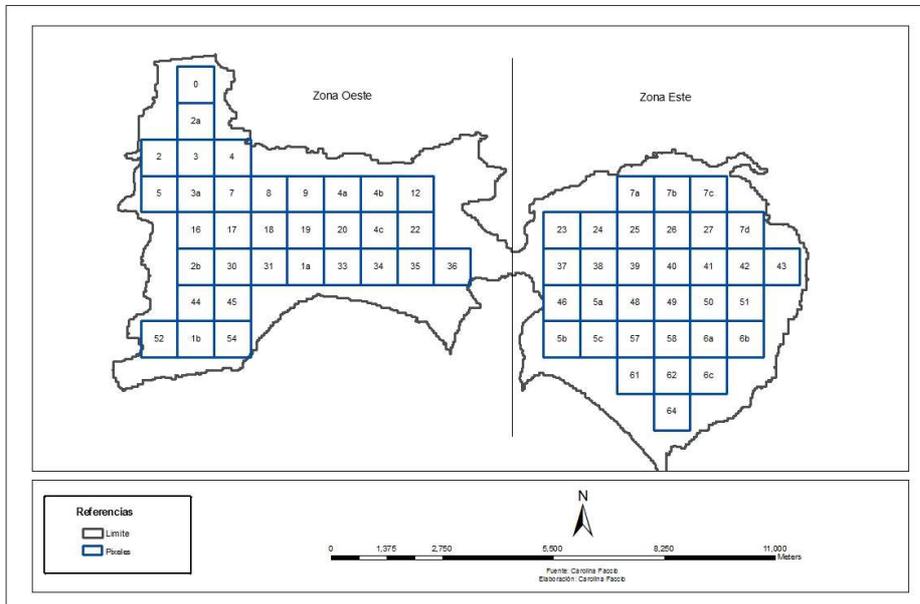


Figura 11. Localización de los píxeles según lo arrojado por el ACP. Los números indican el nombre de los píxeles.

De la misma forma pudo establecerse la existencia de subgrupos dentro de las zonas. En la zona Este se identificaron grupos según la relación establecida con el factor 2, surgiendo 3 subzonas denominadas Este 1, Este 2 y Este 3 (Figura 12) (Gráfico 2). En este caso la

subzona Este 1 se relaciona positivamente con el factor 2 y la subzona Este 2 negativamente, en cuanto a la subzona Este 3 la misma presentó valores cercanos al cero, no mostrando, por tanto, vinculación con este factor (Gráfico 2).

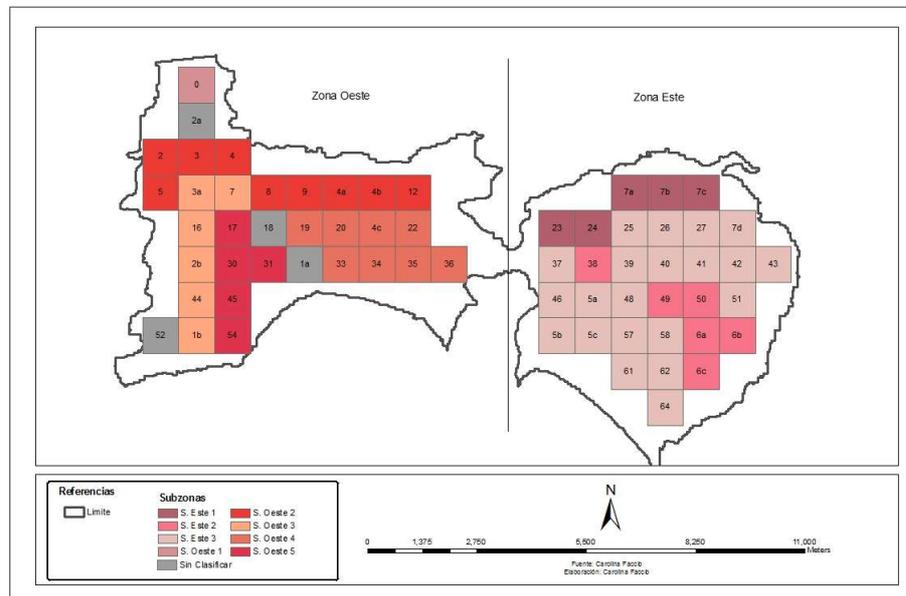


Figura 12. Zonas y subzonas generadas a partir de los ACP. Con números se indica el nombre del píxel.

En cuanto a las zona del Oeste también se realizaron subzonas, las que fueron denominadas: subzona Oeste 1, subzona Oeste 2, subzona Oeste 3, subzona Oeste 4 y subzona Oeste 5. En este caso su relación con el factor 2 no fue tan clara, dado que la mayoría de los píxeles se encontraban entorno al 0, por lo que la agrupación se realizó según el factor 1, exceptuando la subzona Oeste 2, que mostraba una relación cercana al 0 con el factor 1 y positiva con el factor 2 y el de la subzona Oeste 1, en la que el píxel 0 es muy similar a la zona Este 2, pero se encuentra ubicado en la zona Oeste, por lo que será entendido como una zona aparte.

En cuanto a los píxeles 2a, 52, 18 y 1a, no es clara su pertenencia a un grupo u otro, al hacer el análisis espacial de los datos se observa que se encuentran ubicados entre estos grupos, lo que llevo a considerarlos píxeles de transición y por tanto no se les atribuyó una subzona concreta, esto fundamentado en que de incorporarlos a un grupo puede modificar las tendencias de los valores y aproximarlos a otros grupos, lo cual constituye un elemento de dispersión de los datos (Gráfico 2).

3.3.3 Estudio estadístico de los resultados obtenidos a partir del ACP

Para probar los resultados obtenidos a partir de los ACP se procedió a realizar los test estadísticos. En una primera instancia se compararon los grupos de píxeles de las zonas Este y Oeste, posteriormente se hizo el mismo análisis internamente a cada zona, determinando si los conjuntos de píxeles de las subzonas diferían o no.

3.3.3.1 Análisis estadístico de las diferencias entre las zonas Este y Oeste

Se inició el proceso analizando las zonas Este y Oeste, determinando si existían o no diferencias entre los grupos de píxeles. Se tomo como variable independiente (factor) el espacio (zonas) y como variable dependiente el NDVI. Así se partió de una primera hipótesis nula donde se plantea: H_0 : zona Este = zona Oeste y de la hipótesis alternativa, H_1 : zona Este \neq zona Oeste.

Previamente a realizar el test se debió determinar la probabilidad de que las muestras a ser estudiadas provengan de una población con distribución normal y la existencia de homogeneidad de varianzas entre las zonas, para de esta forma conocer el test a utilizar. Es así, que se comenzó con la prueba de Shapiro Wilks. Esta arroja un estadístico w , en el que se tiene en cuenta la diferencia entre cada observación y la media muestral, un coeficiente tabulado de Shapiro Wilk y las diferencias positivas entre las variables extremas. Dicho valor es comparado con el valor w teórico ya tabulado para un n y un grado de confianza determinados. Cuando el w calculado es mayor al w tabulado entonces se acepta la hipótesis nula de que la muestra proviene de una distribución normal, en el caso contrario, cuando el w calculado es menor al w tabulado se rechaza la hipótesis. El test también brinda un p -valor, para un determinado grado de confianza (en nuestro caso 95%), que de ser menor al p -valor teórico se rechaza la hipótesis y se acepta si es superior. Esto quiere decir que si el valor de p es grande, superior a 0.05 y la H_0 verdadera, es esperable el valor de w resultante; en el caso de que el p sea bajo, menor a 0.05 y la H_0 verdadera, el valor de w que se obtuvo es muy difícil que se diera.

De esta forma, se planteó como hipótesis nula que las muestras de las zonas Este y Oeste provenían de una población normal.

Al realizarse la prueba de Shapiro Wilks para las dos muestras, los valores de probabilidad obtenidos fueron para la zona Este $p = 0.15968$ y para la zona Oeste $p = 0.78815$ (Gráficos 3 y 4). En ambos casos fue superado el valor 0.05, por lo que puede establecerse que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula de que los datos provienen de una población normal. Lo cual es apoyado por los histogramas donde puede destacarse que

los datos se acercan a la curva de frecuencia de la población normal teórica. (Gráficos 3 y 4).

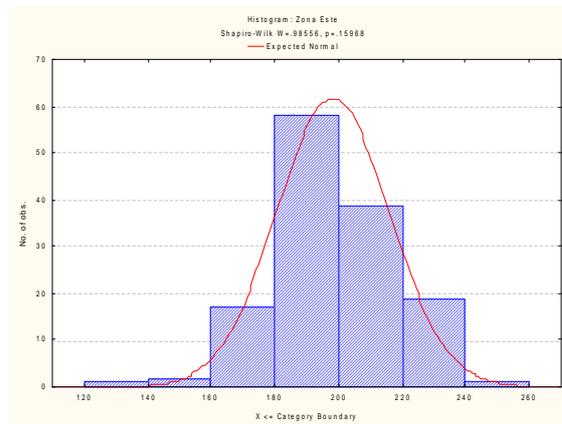


Gráfico 3. Histograma de frecuencias y curva de frecuencia normal teórica zona Este

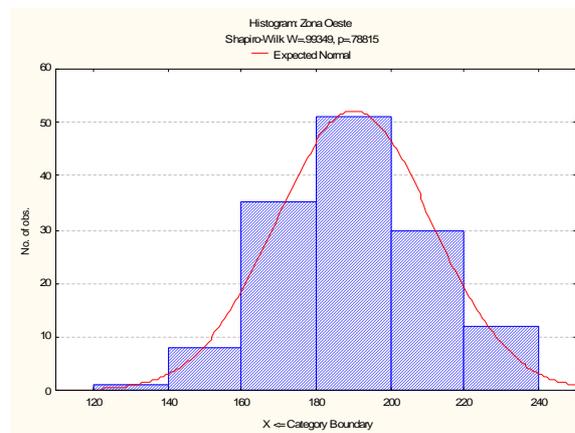


Gráfico 4. Histograma de frecuencias y curva de frecuencia normal teórica zona Oeste.

Posteriormente se procedió a realizar la prueba de Levene, para homogeneidad de varianzas, el cual utiliza un estadístico F y un valor de probabilidad. Esta arrojó un valor de probabilidad=0.022284, para un valor del estadístico F=5.283695, por lo que se debió rechazar la hipótesis de que las dos muestras presentan homogeneidad de varianzas. Debimos entonces recurrir a un test no paramétrico. Debe mencionarse, que previo a esto se realizó la transformación de los datos a Log y $1/\sqrt{x}$, pero el test volvió a dar que no había homogeneidad de varianzas. Por lo que se recurrió a realizar el test de Kruskal Wallis.

Dicho test dio un valor de probabilidad, para un N de 274 y un estadístico de H=11.05401, de 0.0009, inferior al 0.05 establecido, por los que se estuvo en condiciones de rechazar la hipótesis de que ambas muestras provienen de la misma población, de esta forma se optó por aceptar lo aportado por el ACP, identificando a las dos zonas como grupos de píxeles diferentes.

3.3.3.2 Análisis estadístico de las diferencias entre las subzonas del Este

Para este caso se deseaba probar la hipótesis H_0 : subzona Este 1=subzona Este 2=subzona Este 3, para tomar conocimiento si estadísticamente se puede hablar de 3 zonas diferentes. Una vez determinado que se cumplía con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza (Tablas 5 y 6), se estuvo en condiciones de aplicar un test ANOVA de una vía para varias muestras independientes, donde el factor corresponde a las zonas y la variable dependiente al NDVI.

Tabla 5. Prueba de ajuste a la normalidad de Shapiro Wilk, para las tres subzonas pertenecientes a la zona Este. Siendo w el estadístico para un $N=137$ y p el valor de probabilidad. Para las tres subzonas se acepta que las muestras vienen de poblaciones con distribución normal (R).

PRUEBA DE AJUSTE A LA NORMALIDAD DE SHAPIRO-WILK			
Hipótesis	W	p	R
H_0 =subzona Este 1 viene de una población normal.	0.98472	0.13051	Acepta H_0
H_0 =subzona Este 2 viene de una población normal.	0.99017	0.44869	Acepta H_0
H_0 =subzona Este 3 viene de una población normal.	0.98784	0.27179	Acepta H_0

Tabla 6. Prueba de homogeneidad de varianza de Levene, para las tres subzonas Este. La letra F constituye el estadístico de la prueba la p es la probabilidad y la R el resultado es decir si se acepta o rechaza la hipótesis.

PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE VARIANZAS DE LEVENE			
Hipótesis	F	p	R
H_0 =Las subzonas Este 1, 2 y 3 presentan homogeneidad de varianzas	0.431293	0.649964	Acepta H_0

El test ANOVA calcula un estadístico F que establece si existe igualdad de medias entre los grupos a comparar. Si las medias son iguales y las diferencias pueden atribuirse al azar, los valores de F serán bajos, contrariamente a lo que sucede si son distintas, donde el F tomara valores más elevados. El test dará un valor de probabilidad asociado al grado de confianza y al valor de F, que igualmente a los casos anteriores, será de 0.05 este indicará que si el valor es inferior a 0.05, debemos rechazar la hipótesis de existe igualdad de medias y si por el contrario es superior a 0.05 aceptaremos la hipótesis.

De los resultados obtenidos se desprende que todas las muestras presentan valores de probabilidad superiores a 0.05, por lo tanto fue aceptada la hipótesis nula de que todas las zonas provienen de la misma población (Tabla 7).

Tabla 7. Test ANOVA Post Hoc para las subzonas Este.

TEST ANOVA				
LSD test; variable NDVI (este_sub_trans) Probabilidad test Post Hoc Error: entre MS = 343.68, df = 408.00				
	Subzonas	E2	E3	E1
E1	E2		0.068529	0.661923
E2	E3	0.068529		0.165662
E3	E1	0.661923	0.165662	

Este hecho llevó a la generación de dos hipótesis nuevas, por un lado se establece que realmente no existe zonificación dentro del área y por otro se plantea que podrían existir más de una subzona dentro del área, pero que el agrupamiento de píxeles realizado no fue el adecuado. Esto último fue asociado al hecho de que para realizar las subzonas se tomó como principal diferenciador el factor 2, el cual podría no estar aportando diferencias. Por tal motivo se decidió modificar nuevamente la agrupación de píxeles tomando en cuenta el factor 1 y realizar nuevamente los test.

3.3.3.2.1 Nueva zonificación para la subzonas Este

De la nueva agrupación de píxeles, se obtuvieron 2 subzonas distintas, la subzona Este 1 y la subzona Este 2, el resto de los píxeles que se encontraban entre ambas zonas fueron agrupados en la denominada subzona Este 3, y fueron considerados como posible zona de gradiente entre las otras dos (Gráfico 5) (Figura 13).

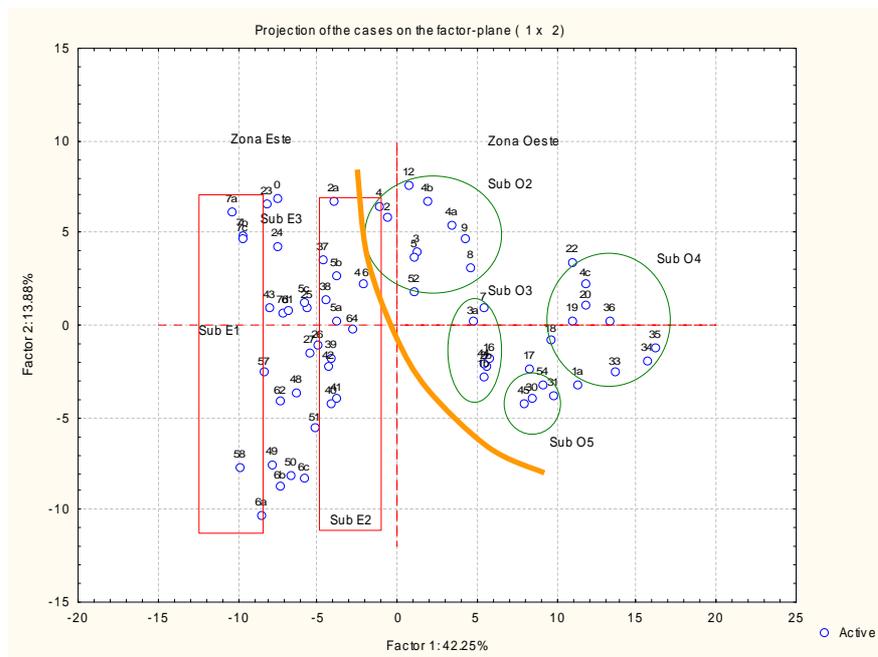


Gráfico 5. Nueva agrupación de píxeles para el establecimiento de las subzonas en la zona Este. En color rojo se presentan las nuevas agrupaciones de píxeles según el factor 1.

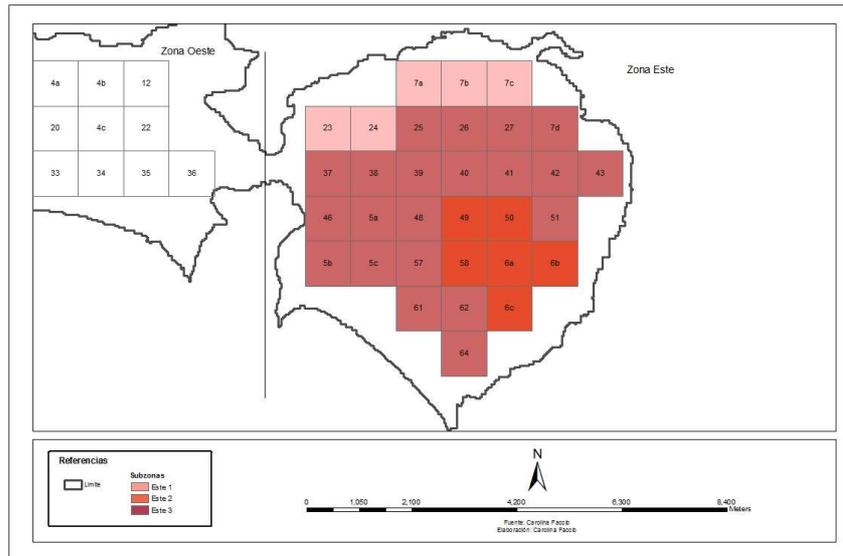


Figura 13. Nuevas subzonas Este, luego de realizada la reagrupación de píxeles

Para aceptar o rechazar la nueva hipótesis, $H_0 =$ subzona Este 1 = subzona Este 2 = subzona Este 3, se procedió a realizar todos los pasos nuevamente. Una vez determinada la existencia de normalidad y homogeneidad de varianza (tabla 8 y 9), se realizó un nuevo test ANOVA.

Tabla 8. Prueba de ajuste a la normalidad de Shapiro Wilk, subzonas Este 1, 2 y 3. W corresponde al estadístico, para un $N=137$, p al valor de probabilidad, y R indica si se rechaza o acepta la hipótesis.

PRUEBA DE AJUSTE A LA NORMALIDAD DE SHAPIRO-WILK			
Hipótesis	W	p	R
$H_0 =$ subzona Este 1 proviene de una población normal.	0.98247	0.07587	Acepta H_0
$H_0 =$ subzona Este 2 proviene de una población normal.	0.98947	0.38837	Acepta H_0
$H_0 =$ subzona Este 3 proviene de una población normal.	0.98696	0.22211	Acepta H_0

Tabla 9. Prueba de homogeneidad de varianza de Levene, para las tres subzonas Este. La letra F constituye el estadístico de la prueba la p es la probabilidad y la R el resultado es decir si se acepta o rechaza la hipótesis.

PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE VARIANZAS DE LEVENE			
Hipótesis	F	p	R
$H_0 =$ Las subzonas Este 1, 2 y 3 presentan homogeneidad de varianzas	0.514974	0.597904	Acepta H_0

De este se desprendió que las subzonas 1 y 2 no provienen de la misma población ($p=0.027790$), por tanto, se estuvo en condiciones de considerarlas subzonas diferentes (Tabla 10). En cuanto a la subzona 3 no presentó diferencias ni con la subzona 1 ni con la 2 ($p_{1,3}=0.315432$, $p_{2,3}= 0.229668$), por lo que se plantea una nueva hipótesis de que esta podría actuar como zona de transición entre ambas (Tabla 10).

Tabla 10. Test ANOVA, Post Hoc LSD para las tres subzonas Este. Los valores indican el valor de p.

TEST ANOVA			
LSD test; variable NDVI (subzonas Este) Probabilidad Test Post Hoc			
Subzonas	Subzona Este 2	Subzona Este 1	Subzona Este 3
Subzona Este 2		0.027790	0.229668
Subzona Este 1	0.027790		0.315432
Subzona Este 3	0.229668	0.315432	

Dicha hipótesis es apoyada por las medias de las tres subzonas, donde los mayores valores los presenta la subzona 1 (media=200.64) seguido por la subzona 3, de transición (media=198.45) y finalmente con los valores mas bajos se presenta la subzona 2 (media=195.86) (Tabla11).

Tabla 11. Medias de las tres subzonas obtenidas a partir de la reagrupación de píxeles del ACP.

SUBZONAS	MEDIA NDVI
Subzona 1	200.64
Subzona 2	195.86
Subzona 3	198.46

La nueva agrupación de píxeles dejó en evidencia diferencias dentro del humedal, lo que no quedó expuesto cuando se efectuó la agrupación según el factor 2.

3.3.3.3 Análisis estadístico de las diferencias entre las subzonas del Oeste

Una vez determinada la existencia de subzonas dentro de la zona Este, pasamos a estudiar el comportamiento de la Oeste, para lo cual partimos de la siguiente hipótesis nula: H_0 =subzona Oeste 1= subzona Oeste 2= subzona Oeste 3= subzona Oeste 4= subzona Oeste 5.

Continuando con la misma metodología que para las subzonas del Este, se procedió a utilizar el test de Kruskal Wallis debido a que no se cumplía con el supuesto de homogeneidad de varianza (Tabla 12 y 13) a pesar de haber realizado las transformaciones de los datos a Log y $1/\sqrt{x}$.

Tabla 12. Prueba de ajuste a la normalidad de Shapiro Wilk, subzonas Oeste 1, 2, 3, 4 y 5. W corresponde al estadístico, para un N=137, p al valor de probabilidad, y R indica si se rechaza o acepta la hipótesis.

PRUEBA DE AJUSTE A LA NORMALIDAD DE SHAPIRO-WILK			
Hipótesis	W	p	R
H ₀ =subzona Oeste 1 viene de una población normal.	0.98626	0.18856	Acepta H₀
H ₀ =subzona Oeste 2 viene de una población normal.	0.99419	0.85536	Acepta H₀
H ₀ =subzona Oeste 3 viene de una población normal.	0.98957	0.39639	Acepta H₀
H ₀ =subzona Oeste 4 viene de una población normal	0.99206	0.63772	Acepta H₀
H ₀ =subzona Oeste 5 viene de una población normal	0.98646	0.19759	Acepta H₀

Tabla 13. Prueba de homogeneidad de varianza de Levene, subzonas Oeste. La p indica la probabilidad para un determinado F (estadístico de la prueba) y la R indica si es aceptada o rechazada la hipótesis.

PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE VARIANZAS DE LEVENE			
Hipótesis	F	p	R
H ₀ =Las subzonas Oeste 1, 2, 3, 4 y 5 presentan homogeneidad de varianzas	5.511191	0.000227	Rechaza H₀

Los resultados del test muestran que la única subzona que se diferencia del resto es la Oeste 1, el resto no mostraron diferencias (Tabla 14). Es así que se procedió a eliminar esta zona del análisis y pasar a un nivel jerárquico inferior para determinar si existían diferencias entre aquellas zonas más parecidas. Planteándose como nueva hipótesis H₀= subzona Oeste 2= subzona Oeste 3= subzona Oeste 4= subzona Oeste 5.

Tabla 14. Test de Kruskal-Wallis, para las subzonas Oeste. N = 685. En color rojo se indican los valores p que rechazan la hipótesis de que las muestras provengan de la misma población.

TEST KRUSKAL-WALLIS					
Comparación múltiple p valor; NDVI, : H =33.17990 p =.0000					
	Subzona Oeste 2	Subzona Oeste 1	Subzona Oeste 3	Subzona Oeste 4	Subzona Oeste 5
Subzona Oeste 2		0.025312	1.000000	0.107988	1.000000
Subzona Oeste 1	0.025312		0.003954	0.000000	0.000723
Subzona Oeste 3	1.000000	0.003954		0.428081	1.000000
Subzona Oeste 4	0.107988	0.000000	0.428081		1.000000
Subzona Oeste 5	1.000000	0.000723	1.000000	1.000000	

El mismo procedimiento se realizó con las 4 subzonas restantes. Dado que no hubo cambios en los datos, no se volvieron a realizar las pruebas de normalidad aceptándose el supuesto de normalidad. En el caso de la homogeneidad de varianzas el supuesto fue rechazado (Tabla 15), y se paso entonces a realizar el test no paramétrico de Kruskal Wallis (Tabla 16).

Tabla 15. Prueba de homogeneidad de varianza de Levene, subzonas Oeste, excluyendo la subzona Oeste 1. La p indica la probabilidad para un determinado F (estadístico de la prueba) y la R indica si es aceptada o rechazada la hipótesis.

PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE VARIANZAS DE LEVENE			
Hipótesis	F	p	R
H ₀ =Las subzonas Oeste 2, 3, 4 y 5 presentan homogeneidad de varianzas	4.269214	0.005405	Rechaza H₀

Del test se desprende que las subzonas 2 y 4 eran diferentes entre ellas (P=0.045821), pero no con el resto de las subzonas. Al observar nuevamente el grafico del ACP se determina que las subzonas 3 y 5 se encuentran entre las subzonas 4 y 2, pudiendo ser zonas de transición espacial entre la 2 y la 4, por lo tanto, y al corroborarse que entre ellas no existía diferencias y que tampoco lo había entre la 3-5 y la 4 y el 3-5 y el 2, se optó por conformar un nuevo grupo donde las subzonas 3 y 5 pasaron a formar parte de una única subzona. Obteniéndose una nueva hipótesis de que las zonas 3-5 conformaban una zona de transición entre la 2 y la 4 (Tabla 16).

Tabla 16. Test de Kruskal-Wallis, para las subzonas Oeste, excluyendo del análisis la subzona Oeste 1. N=548.

Test de Kruskal-Wallis				
Comparación Múltiple valores p; NDVI, H =7.881193 p =.0485				
	Subzona Oeste 2	Subzona Oeste 3	Subzona Oeste 4	Subzona Oeste 5
Subzona Oeste 2		1.000000	0.045821	1.000000
Subzona Oeste 3	1.000000		0.219669	1.000000
Subzona Oeste 4	0.045821	0.219669		0.628430
Subzona Oeste 5	1.000000	1.000000	0.628430	

Por tanto fueron agrupados los datos de las subzonas 3 y 5 y se realizó nuevamente el test de Kruskal Wallis (dado que no se cumple con el supuesto de homogeneidad de varianza, (F=5.505971 y p= 0.004370), excluyendo la subzona Oeste 1, (Tabla 17). La prueba de normalidad de Shapiro Wilks de la nueva subzona que arrojó un W=.98801, p=.28214.

La nueva hipótesis a ser probada fue $H_0 = \text{subzona Oeste 2} = \text{subzona Oeste 3-5} = \text{subzona Oeste 4}$.

Tabla 17. Test de Kruskal Wallis. Para las subzonas 2,3-5 y 4, N=411.

Test de Kruskal Wallis			
Comparación múltiple valores p ; NDVI, H=7.625193 p =.0221			
	Subzona Oeste 2	Subzona Oeste 3-5	Subzona Oeste 4
Subzona Oeste 2		1.000000	0.021028
Subzona Oeste 3-5	1.000000		0.187012
Subzona Oeste 4	0.021028	0.187012	

Nuevamente el test mostró diferencias entre las subzonas 2 y 4, pero no de estos con el nuevo grupo 3-5 (tabla 17), existiendo una mayor diferencia entre las subzonas 3-5 con la 4 que de la 3-5 con la 2.

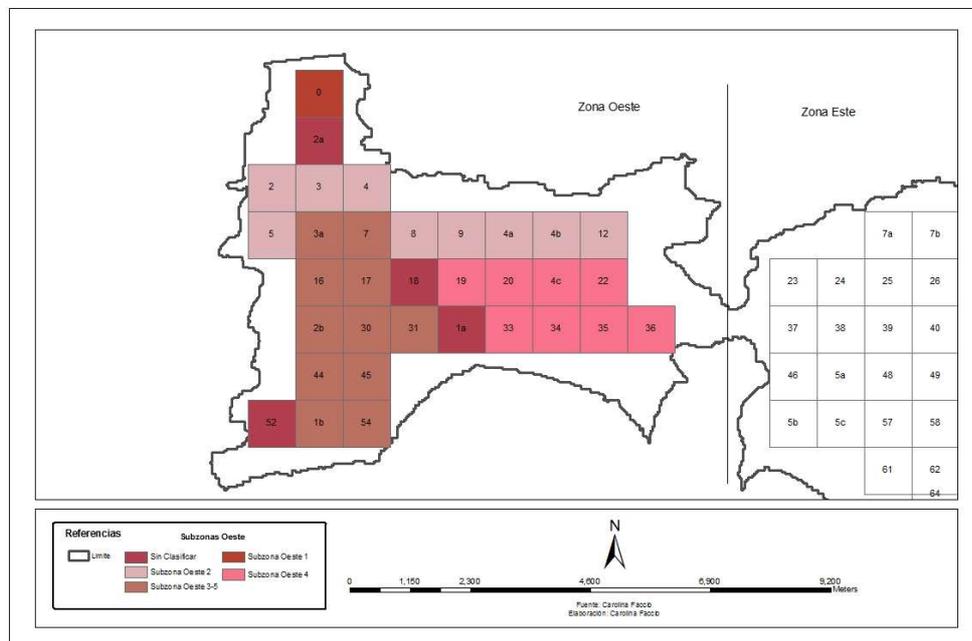


Figura 14. Subzonas resultantes de la zona Oeste.

De esta forma se está en condiciones de afirmar que la zona Oeste presenta 4 subzonas 1, 3-5, 2 y 4 (Figura 14). Siendo la que presenta mayor diferencia la subzona Oeste 1. En un nivel jerárquico menor se puede diferenciar entre las subzonas 2 y 4. En cuanto a la subzona 3-5 surge como hipótesis la posibilidad de que esta subzona se comporte como una zona de transición entre la 2 y la 4, lo cual es apoyado por los valores de las medias de cada subzona (Tabla 18). Según las medias de NDVI se puede observar un gradiente en la productividad que desde el Noroeste al Sureste, existiendo un cambio más abrupto hacia el este de la zona entre las subzonas 2 y 4.

Tabla 18. Medias del NDVI de las subzonas Oeste

SUBZONAS	MEDIA NDVI
Subzona 1	200.79
Subzona 2	192.76
Subzona 3-5	190.6
Subzona 4	185.23

En cuanto a la subzona 3-5 podríamos decir que presenta características de la subzona 2 y la 4, que no permite identificarlas como subzonas completamente independientes, siendo más similar a la subzona 2 que a la subzona 4.

3.4 Análisis del Comportamiento temporal del NDVI

El análisis fue realizado estudiando el comportamiento temporal, respecto al NDVI de cada zona, incluyendo las subzonas. Posteriormente fueron incorporadas las variables temperatura y precipitación, con el fin de detectar una posible relación entre el NDVI y dichas variables.

3.4.1 Comportamiento temporal de las subzonas del Este

Para estudiar el comportamiento de las subzonas del Este, se efectuó un análisis cualitativo del comportamiento de cada una en el tiempo, estableciendo las relaciones existentes entre éstas.

De las curvas exponenciales negativas de NDVI se desprendió que existen dos subzonas con comportamiento similar a lo largo del tiempo, dándose un pequeño defasaje que muestra una mayor productividad de la subzona 1 con respecto a la 3. La subzona 2, presenta un comportamiento diferente a las anteriores, mostrando menos tendencia al aumento o disminución de su NDVI (Gráfico 6).

Para las subzonas Este 3 y 1, el período se inicia con un incremento del NDVI, hasta abril del 2001, donde comienza una fase de descenso en los valores. En octubre de 2006 se inicia nuevamente un incremento que supera los máximos registrados en el 2001.

La subzona 2 registra una débil tendencia a la disminución desde abril de 1999 hasta julio de 1999. Luego se mantiene estable hasta octubre del 2006, donde comienza a incrementar los valores de NDVI, acompañando a partir de esta fecha el comportamiento creciente de las otras dos subzonas.

Los valores más bajos de NDVI fueron para la subzona Este 3, la que solamente alcanza a superar la subzona 2 desde octubre 1999 a octubre de 2001. En cuanto a la relación de las subzonas Este 1 y 2, es variable ya que el periodo se inicia con una débil superioridad de la subzona 2 pero en abril de 1999, luego de iniciada una etapa de incremento por parte de la 1, comienza a dominar esta última. En octubre de 2003 la situación se invierte pasando a dominar la subzona 2, situación que se mantuvo por el resto del periodo (Gráfico 6).

Entre julio de 2004 y enero de 2007, se observó que el NDVI no presenta picos importantes de máximos y mínimos, en este mismo periodo puede verse que las curvas se alejan entre ellas a diferencia del resto del periodo.

Por otra parte, a medida que nos acercamos a la fecha actual puede detectarse la existencia de picos que están siendo cada vez más extremos, mostrando que los cambios en el NDVI son cada vez más abruptos.

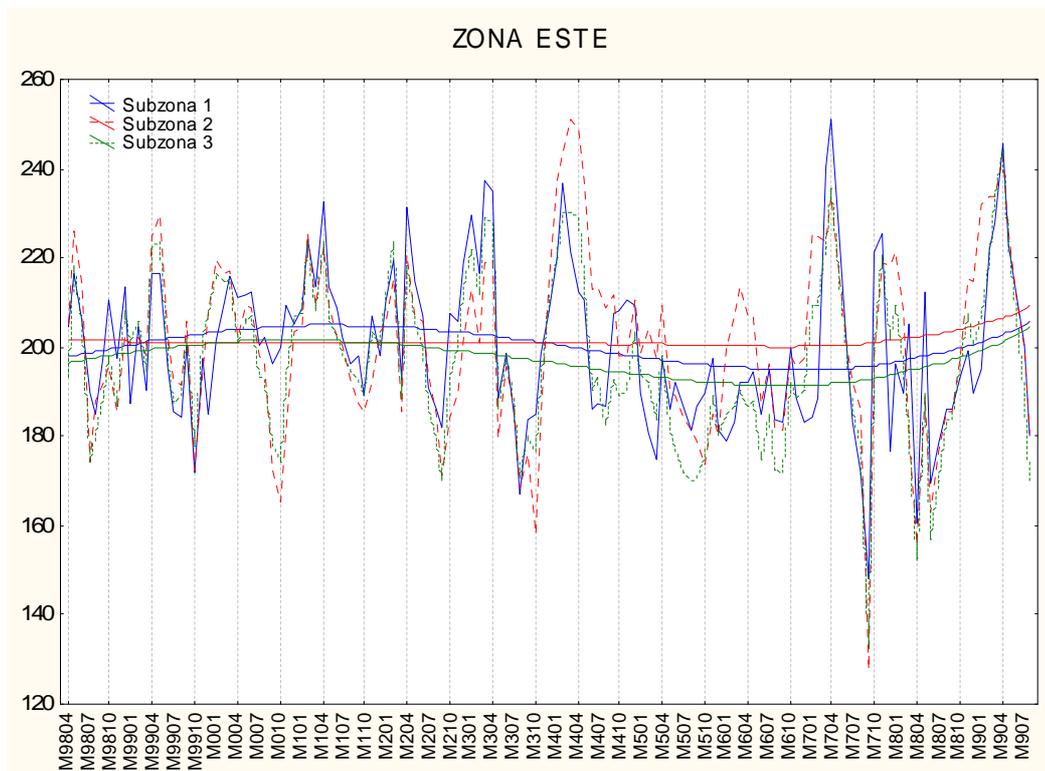


Gráfico 6. Comportamiento y curva exponencial negativa de las subzonas Este 1,2 y 3. Código del eje de las ordenadas: M/año/mes. La M indica que corresponde al valor de un mes.

En cuanto al comportamiento general, es fluctuante a lo largo del tiempo presentando una serie de años donde predominan valores altos de NDVI y conjuntos de años que tienden a valores bajos, mostrando la existencia de distintos periodos en el comportamiento del humedal para lapsos de tiempo largos.

3.4.2 Comportamiento temporal de las subzonas del Oeste

Las subzonas del Oeste presentan una respuesta similar, si bien existen pequeñas fluctuaciones, en términos generales, el comportamiento de las curvas se mantiene relativamente paralelo, exceptuando el caso de la subzona 3-5, la cual luego de abril de 2004, inicia una etapa de incremento superando al resto (Gráfico 7).

En términos generales, puede decirse que todas las subzonas del Oeste inician el periodo de estudio con valores de NDVI bajos que van aumentando hasta abril del 2000, en esta fecha se mantienen estables por un periodo corto de tiempo y luego comienza un descenso en la productividad hasta el 2005, donde se registra un nuevo incremento.

En la zona Oeste, la subzona más productiva es la 1 seguida de la 2 y luego de la 4. La subzona 3-5, que hasta abril del 2004 presentaba el mismo comportamiento que el resto y se ubicaba entre las subzonas 2 y 4, a partir de abril de 2004 se inicia una etapa de incremento muy pronunciado en la productividad de biomasa, al punto que en setiembre de 2008 termina por superar a la subzona 1.

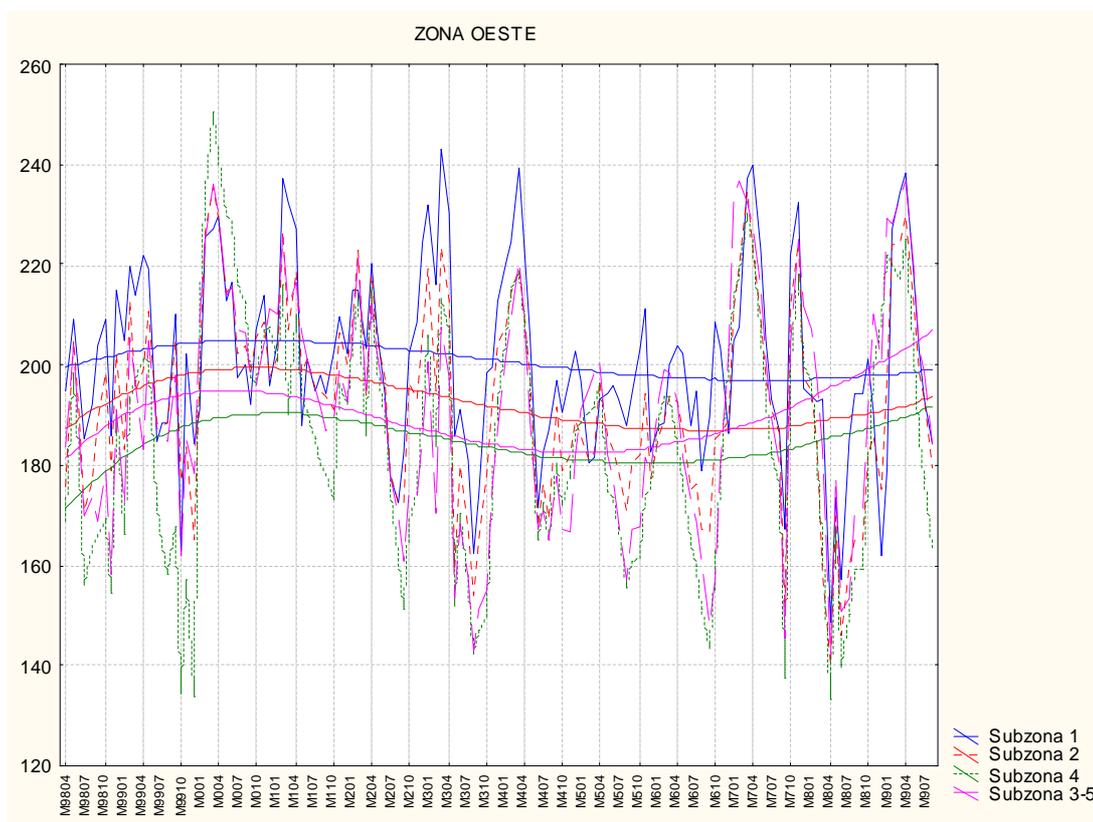


Gráfico 7. Comportamiento temporal y curva exponencial negativa de las subzonas del Oeste. Código del eje de las ordenadas: M/año/mes. La M indica que corresponde al valor de un mes.

La subzona 4 presenta un comportamiento similar al de la subzona 3-5, aunque presenta una curva mas estable, en el último periodo supera, al igual que la subzona 3-5, el máximo valor registrado en el 2000. Mientras que las subzonas 1 y 2 si bien aumentan sus productividades en este periodo no llegan a superar los valores registrados en el 2000.

Al igual que las subzonas Este, entre julio de 2004 y diciembre de 2006 se observa un periodo donde no se registran picos máximos y mínimos mostrando la existencia de un periodo medianamente estable.

Siguiendo la misma lógica que las subzonas Este, las curvas exponencial negativa muestran que existen periodos en el comportamiento de las subzonas, en espacios de tiempo largos, que como se menciono anteriormente, comienza con un incremento en los valores de NDVI, seguido por un descenso y culminando el periodo con una tendencia alcista que no supera los valores máximos registrados en el año 2000.

3.4.3 Comportamiento temporal de las zonas Este y Oeste.

Al comparar las subzonas del Este con las del Oeste se desprende que las primeras, son más productivas que las segundas, exceptuando el caso de la subzona oeste 1, que presenta un comportamiento similar a las subzonas del este, tal como se observo al realizar los ACP (Gráfico 8).

Todas las subzonas presentan la misma tendencia, al inicio del periodo se encontraban en una fase de aumento en la productividad, la cual pasado un tiempo llega a su punto máximo y comienza una fase de decrecimiento hasta llegar a un punto mínimo, donde nuevamente se da un punto de inflexión y crece. En estas fases pueden observarse diferencias entre las subzonas del este y del oeste. En el caso de las subzonas del Este, el máximo registrado desde abril del 2000 hasta abril de 2001 no es tan extremo. El mismo presenta una cresta chata, expresando que los cambios no se dan tan abruptamente como sucede en el caso de las zonas Oeste. A pesar de esto, la tendencia en las últimas épocas es a cambiar hacia un crecimiento que se asemeja al de la zona Oeste.

La subzona Este 2 es la única zona que presenta un comportamiento distinto al resto, manteniendo su NDVI constante la mayoría del tiempo, en el 2005 se observa un cambio y la zona comienza a tener un comportamiento que acompaña al resto de las zonas.

Por otra parte la subzona Oeste 1, que presentaba semejanzas a los largo de todo el periodo con las subzonas del Este, comienza a separarse de estas curvas y a presentar una mínima cercanía con las subzonas de la zona Oeste, a la cual pertenece.

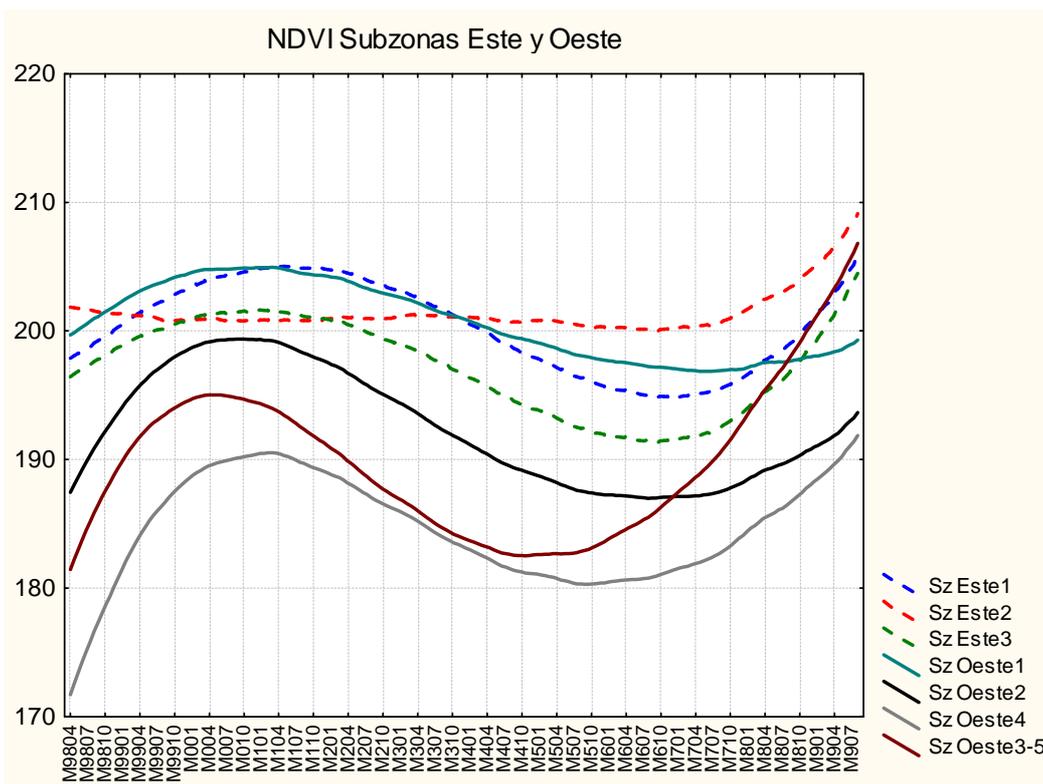


Gráfico 8. Curvas exponencial negativa de las subzonas del Este y Oeste. Código del eje de las ordenadas: M/año/mes. La M indica que corresponde al valor de un mes.

3.4.4 Evolución temporal del NDVI y las variables meteorológicas.

Tras hacer un análisis de la evolución que ha tenido la producción de biomasa en el tiempo para cada una de las subzonas y zonas del humedal, se procedió a relacionarlas con las principales componentes que determinan el clima, temperatura y precipitación. Se realizó un análisis de correlación lineal, a escala de subzonas, para establecer la existencia de relaciones entre las variables climáticas y el NDVI. Para ello se calcularon los coeficientes de correlación y se generaron gráficos de dispersión.

El coeficiente de correlación utilizado fue el de Spearman, el cual determina la correlación entre dos variables para grupos de muestras no paramétricos. Como la temperatura y precipitación no presentaron normalidad (precipitación: Shapiro-Wilk $W=0.92277$, $p=0.00000$, Temperatura: Shapiro-Wilk $W=0.94503$, $p=0.00003$) se debió descartar el coeficiente de correlación de Pearson y recurrir a dicho coeficiente.

Los resultados obtenidos muestran que en la mayoría de las zonas no existe evidencia estadística suficiente que permita establecer una correlación lineal entre el NDVI y la precipitación (Tablas 18 y 19). De esta situación se excluyen los casos de las subzonas Oeste 2 y Este 1, en las cuales si existe evidencia estadística, pero en ambos casos los valores resultantes son bajos, mostrando una relación muy débil entre las dos variables. Los gráficos de dispersión y las curvas de precipitación, para el periodo de tiempo

considerado, acompañan estos resultados, la nube de puntos se encuentra dispersa no acompañando la recta teórica de relación lineal perfecta (Gráfico 9).

Para el caso de la temperatura, todas las subzonas mostraron una correlación estadísticamente significativa, cuyo grado de relación varía de moderado a débil (tablas 18 y 19). Al compararse las gráficas de dispersión de temperatura y precipitación, puede notarse un pequeño acercamiento y mejor distribución de la nube de puntos entorno a la recta teórica de la primera, que igualmente no presentan un ajuste importante, siendo coherente con los resultados obtenidos a partir del cálculo del coeficiente de correlación de Spearman (Gráfico 10).

Tabla 18. Coeficiente de correlación de Spearman Temperatura-NDVI y Precipitación-NDVI para las subzonas oeste. En rojo se presentan aquellos valores que son significativas estadísticamente para un 95 % de confianza.

Correlación de Spearman (ZONA OESTE)				
	Subzona oeste 1	Subzona oeste 2	Subzona oeste 4	Subzona oeste 3-5
pp	0.121395	0.179015	0.161665	0.146259
T	0.381008	0.371220	0.444802	0.443784

Tabla 19. Coeficiente de correlación de Spearman Temperatura-NDVI y Precipitación-NDVI para las subzonas este. En rojo se presentan aquellos valores que son significativas estadísticamente para un 95 % de confianza.

Correlación de Spearman (ZONA ESTE)			
	Subzona este 1	Subzona este 2	Subzona este 3
pp	0.216153	0.039635	0.101728
T	0.255143	0.389231	0.465444

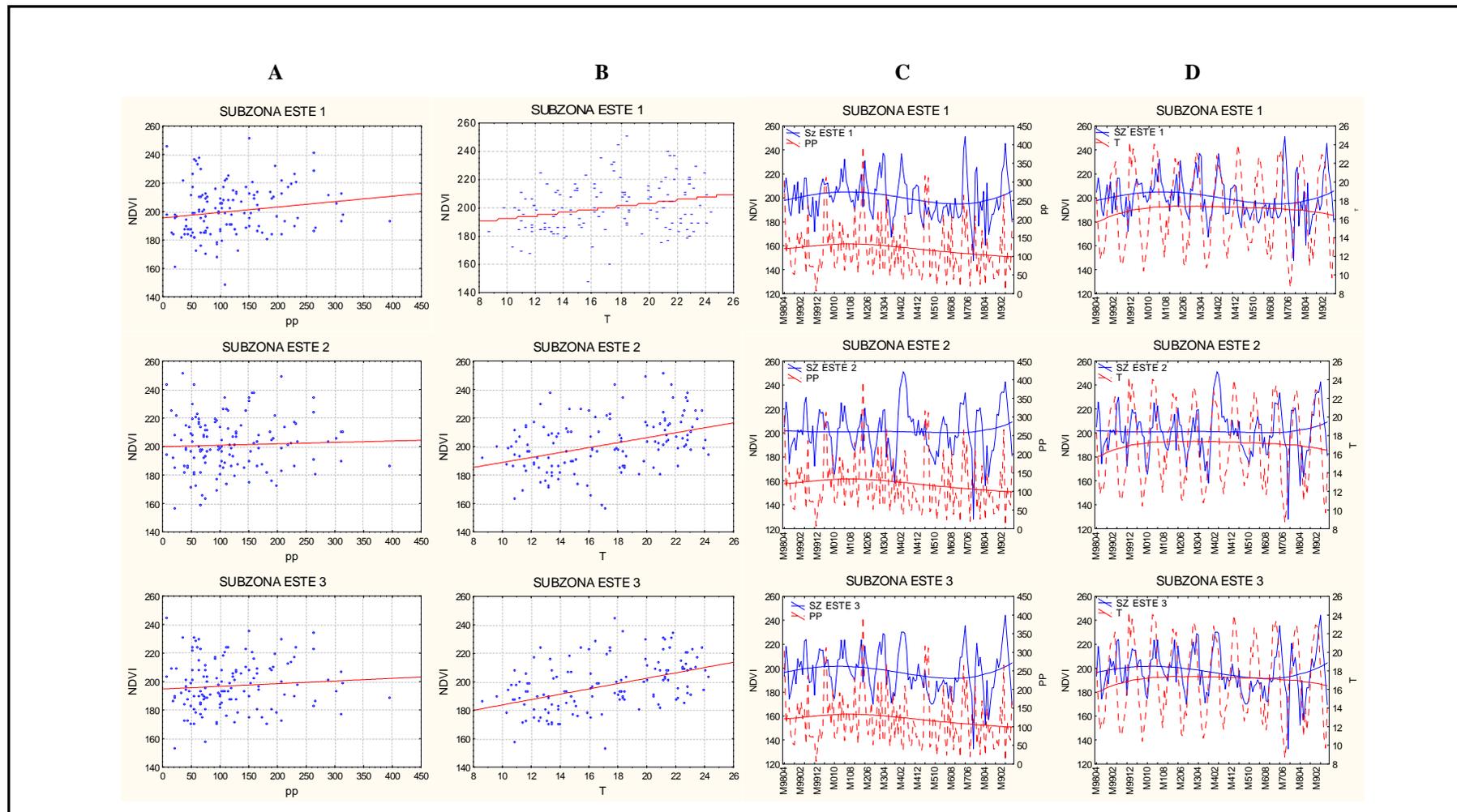


Gráfico 9. Zona Este. **Columna A-** Gráficos de dispersión: precipitación y NDVI. **Columna B-** Grafico de dispersión temperatura y NDVI. **Columna C-** Variación temporal de la precipitación y el NDVI. **Columna D-** Variación temporal de la temperatura y el NDVI.

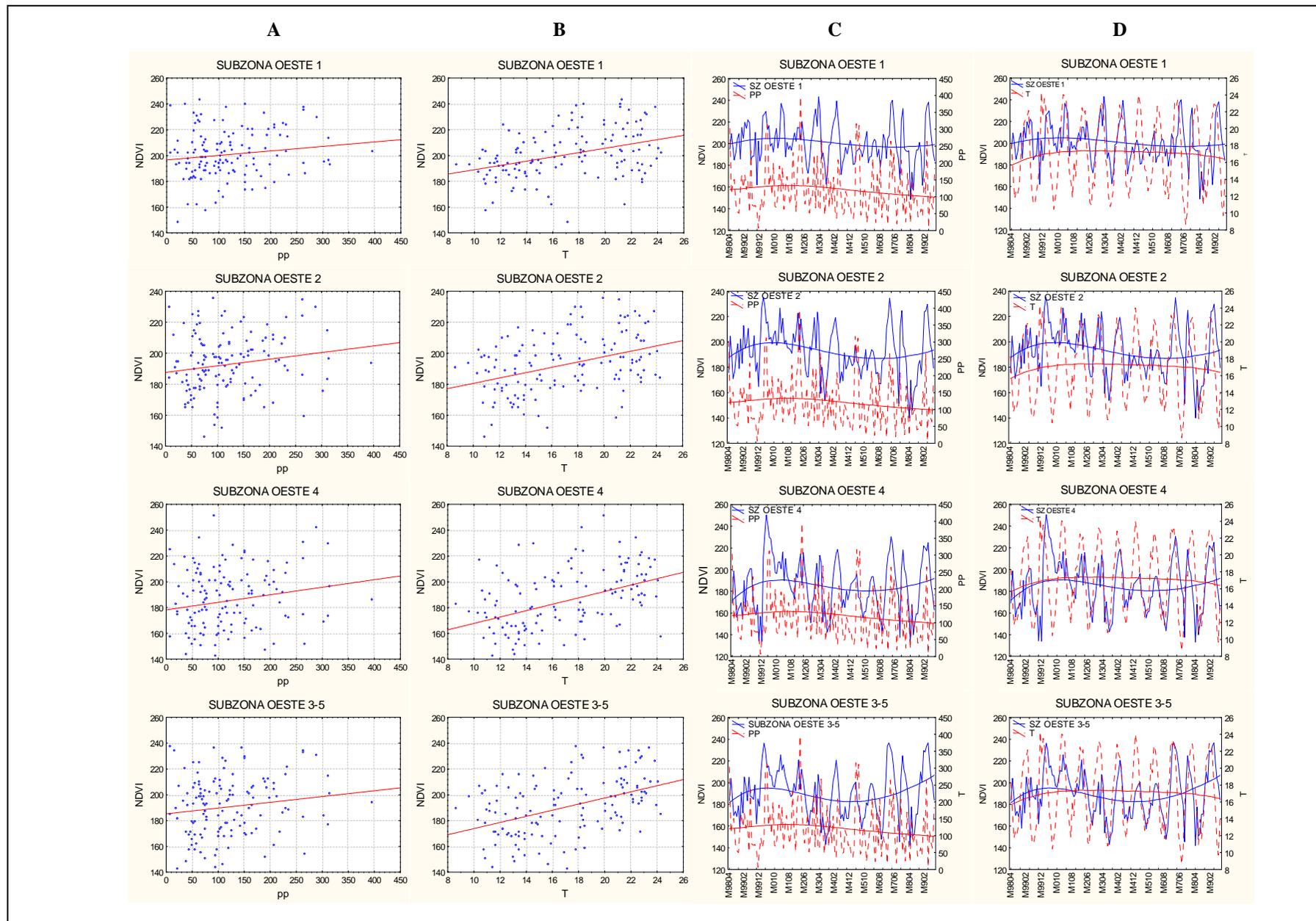


Gráfico 10. Zona Oeste **Columna A-** Gráficos de dispersión: precipitación y NDVI. **Columna B-** Grafico de dispersión temperatura y NDVI. **Columna C-** Variación temporal de la precipitación y el NDVI. **Columna D-** Variación temporal de la temperatura y el NDVI.

4. DISCUSIÓN

El proceso lógico utilizado para establecer los límites del humedal permitió integrar los conceptos que definen un humedal. Utilizar la carta CONEAT como punto de partida, permitió utilizar los suelos hidromórficos, que son considerados un elemento importante para determinar la existencia de un humedal (Cowardin *et al.*, 1979; citado en Berlanga y Ruiz, 2004; Williams, 1991). La imagen satelital, no solo permitió determinar que la zona se encontraba en una transición entre un ecosistema acuático y terrestre, tal como lo expresan Mitsch, Gosselink y Williams (Mitsch y Gosselink, 2007; Williams, 1991), sino también, corregir los inconvenientes provocados por los defasajes del CONEAT con respecto al resto de la cartografía. Por otra parte la interpretación de la imagen dejó resaltar los cambios que se daban en la vegetación entre las tierras altas y bajas (Mitsch y Gosselink, 2007; Cowardin *et al.*, 1979; citado en Berlanga y Ruiz, 2004), quedando expuesta la asociación entre ésta, los tipos de suelos, las alturas y las pendientes.

De la zonificación realizada a escala de detalle, se obtuvo información sobre la situación del humedal al comienzo del estudio, asistiendo a una mejor comprensión de su funcionamiento, y se determinó la existencia de las dos zonas: la Este y la Oeste. En contrapartida se observó que brinda información para un determinado momento que no necesariamente es representativo de la situación habitual del humedal. En este sentido previamente se realizó una exploración con otras fechas y se advirtió que cambiaban bruscamente con el tiempo, llevando a descartar su utilización como mecanismo para zonificar el humedal.

El ACP, acompañado de los test estadísticos, permitió en algunos casos verificar las agrupaciones y en otros repensarlas, como sucedió en el este con todas las subzonas y en el oeste con las 3 y 5.

Por otra parte, ambos procedimientos llevaron a confirmar que realmente la zonificación inicial a escala de detalle generaba información para un momento dado que no eran representativos del comportamiento general del humedal. El conjunto de herramientas estadísticas demostraron que dentro del humedal existen zonas cuyos comportamientos son diferentes, tomando una escala temporal amplia.

El gráfico 8 permite realizar el análisis de la evolución temporal de las subzonas en conjunto, del cual se desprendió que dentro de la zona Este, la 1 y la 3 responden de igual forma a lo largo del tiempo, en tanto que la 2 lo hace de forma diferente, manteniendo estable la producción de biomasa hasta el final del periodo en que aumenta abruptamente. Esta situación lleva a concentrar la atención en la misma, dado que este comportamiento diferencial podría indicar la presencia de algún factor condicionante, natural o antrópico, que el resto de la subzonas no lo están soportando. Las diferencias

en los valores del NDVI, indican la existencia de algún factor que está regulando la productividad del humedal. La existencia de microrelieve podría ser uno, pequeños cambios en alturas y pendientes, regularían la cantidad de agua que queda retenida en los suelos, provocando modificaciones en la respuesta de la vegetación. La proximidad a los bordes del humedal, es otro elemento a tener en cuenta, las subzonas localizadas al borde del humedal tendrían aportes de nutrientes directos desde las tierras altas. La existencia del canal que atraviesa la zona, incluido dentro de la subzona 3 también podría estar regulando el régimen hídrico de forma directa y afectando de forma indirecta a las otras dos. En el caso de la zona Oeste, sucede una situación similar, existen 3 subzonas con comportamiento parecido y una que al final del período se desprende del resto. La subzona 3-5, a partir de abril del 2005 aumenta abruptamente separándose por completo del resto. Las posibles explicaciones a este fenómeno sería la llegada diferencial de nutrientes a la zona, mientras que las diferencias en la producción de biomasa a nivel general estarían dado por el factor mencionado y por los cambios en el microrelieve.

Entre la zona Este y Oeste, encontramos diferencias en el NDVI, siendo la primera más productiva que la segunda, al igual que en el caso anterior, se apunta a las mismas causas y se incorporan la diferencia en la extensión y la conectividad existente entre la zona Oeste con los humedales localizados al norte de la ruta 14. La extensión del humedal, hace que las aguas de escurrimiento superficial lleguen primero a los bordes del humedal y le sea más difícil acceder a las zonas centrales, mientras que en el Este es más factible que pueda hacerlo. En cuanto a la conectividad con otros humedales, se podría dar el ingreso de aguas más limpias ya que parte del agua que llega es filtrada previamente por otros humedales.

En cuanto a la relación entre el NDVI de las subzonas y las variables meteorológicas, temperatura y precipitación, no se encontró una vinculación significativa. Si bien la temperatura mostró mayor correlación con la variable, no se consideró que fuera determinante en la producción de biomasa vegetal. En lo que refiere a precipitación únicamente dos subzonas mostraron una correlación que fue débil. Estos hechos indican la existencia de otros factores que provocan cambios en el comportamiento de la vegetación en forma integrada con las variables meteorológicas trabajadas. Se plantean así 3 nuevos elementos considerados por Mitsch y Gosselink como los principales factores controladores de un humedal: el régimen hídrico de los suelos del humedal, que podrían responder a otros aportes externos de agua vinculados a flujos de aguas subterráneos y flujos desde escurrimientos superficiales, aportes externos de nutrientes que llegan desde zonas altas y a cambios en la composición florística y riqueza del humedal vinculados a los dos factores mencionados (Mitsch y Gosselink, 2007).

El aporte de agua a través de flujos que llegan desde las reservas subterráneas o desde la cuenca de la Laguna Merín podría regular el régimen hídrico de los suelos del humedal. Las aguas subterráneas podrían aportar aguas en épocas secas, haciendo que el humedal no sienta los efectos de los periodos secos, cambiando los periodos en que la vegetación carece de agua y por tanto modificando su respuesta productiva en el tiempo. En cuanto a los aportes de agua desde la cuenca de la Laguna Merín, existe una conexión directa entre los humedales vinculados a ambas lagunas que podrían provocar cambios en la dirección del flujo, dependiendo de las precipitaciones que se den en cada una de ellas. Así se daría un aporte en dirección a la Laguna Negra, cuando las precipitaciones son mayores en la cuenca de la Laguna Merín y a la inversa cuando son mayores en la Laguna Negra. Esta idea es fortalecida por la existencia de canales de drenaje que vuelcan las aguas de la cuenca de la Laguna Merín a la Negra. Pasando entonces la vegetación de los humedales a depender de las precipitaciones que se dan en la cuenca vecina. Debiéndose los cambios en las respuestas espectrales de la vegetación a posibles modificaciones en la composición, riqueza y producción ecosistémica del humedal (Mitsch y Gosselink, 2007). Este nuevo enfoque podría evaluarse a través de un análisis del régimen hídrico de los suelos de cada subzona teniendo en cuenta las precipitaciones externas a la cuenca.

Otro mecanismo que podría explicar las variaciones temporales del humedal es el aporte externo de nutrientes, lo cual es uno de los principales elementos que determinan la productividad de un ecosistema de humedal (Mitsch y Gosselink, 2007). Este hecho se sustentaría por la presencia de subzonas con NDVI mas elevados próximas a los bordes del humedal, donde se desarrollan cultivos. La subzona oeste 3-5 fue la única que encontrándose próxima a los bordes dio valores bajos. La explicación a tal situación podría estar dada por su ubicación con respecto a las actividades productivas realizadas en el entorno. Es esperable que la subzona reciba menos aportes que el resto, dado que las tierras ubicadas al oeste del humedal presentan suelos superficiales con altas pendientes, donde únicamente pueden realizarse prácticas pecuarias, las que requieren menores aplicaciones de fertilizantes. Asimismo la evolución temporal de todas las subzonas sustentan esta idea, dado que a partir del año 2001, cuando el país comenzó a sentir la importante crisis económica del 2002, se registra un descenso de la productividad en todas las zonas, lo que podría estar mostrando una disminución en los aportes de fertilizantes a causa del alto costo. A partir del 2004, cuando se inicia la recuperación del país, se da una nueva etapa donde los productores nuevamente aumentan el uso de insumos agroquímicos. El humedal puede haber acompañado el proceso mediante su condición de trampa de sedimentos asociado a la de purificación de las aguas. Absorbiendo los sedimentos y las aguas cargadas de nutrientes debido a las

actividades agrícolas del entorno. Esto mismo podría explicar la diferencia de NDVI en las zonas Este y Oeste, ya que la primera presenta un entorno con mayor presión por actividades agrícolas, teniendo por tanto mayor cantidad de nutrientes a su disposición que la segunda, la que a su vez al presentar una extensión superior, asociado a mayor cantidad de vegetación, posee una capacidad más elevada de absorber las sustancias que le llegan.

Otra explicación a la variación temporal y espacial del humedal, puede ser establecida a partir de la composición y la situación de la vegetación, vinculada a los cambios espaciales en los regímenes hídricos de los suelos y perturbaciones que sufran las comunidades. La existencia de distintas zonas dentro del humedal puede deberse a la existencia de diferentes comunidades vegetales o la existencia de una misma comunidad que varía en cuanto a su composición. Es decir que podrían existir áreas donde mejor se adapta una especie y áreas donde crece otra especie mejor adaptada, manteniendo en menor cantidad el conjunto de especies en todo el humedal. Esto daría una variación en el NDVI según la especie que domine, y una variación temporal que acompañaría los cambios en la composición o riqueza, pero donde se registrarán diferencias en cuanto a cual es la especie que produce mayor cantidad de biomasa. Estos cambios, podrían estar asociados a la existencia de una perturbación como el pastoreo o los incendios, los cuales podrían estar determinando las modificaciones que se dan en las comunidades, ya que la vegetación respondería a la perturbación mediante un aumento de la utilización de energía solar incidente para la producción de biomasa, explicando de esta forma los cambios en el tiempo.

Finalmente, otro factor que pondría regular la producción de biomasa es la cantidad de horas acumuladas de insolación directa (heliofanía). De esto depende la cantidad de energía disponible, que las plantas utilizaran para realizar la fotosíntesis y generar biomasa vegetal. Así, a mayor cantidad de horas de sol las plantas responderán incrementando la biomasa vegetal.

5. CONCLUSIONES

La investigación realizada generó nuevo conocimiento sobre el funcionamiento del humedal del norte de la Laguna Negra. La metodología utilizada, se considera apropiada, de aplicación fácil y concreta, permitiendo dar continuidad a los estudios a lo largo del tiempo, así como también su aplicación a otros ecosistemas y en estudios de diferentes escalas. Se avanzó en establecer límites al humedal, lo que fue posible gracias a la herramienta que representan los SIG y a la cartografía preexistente.

De las zonificaciones con alta resolución espacial y temporal, se desprende que las imágenes Landsat sirven como mecanismo preliminar de exploración, constituyendo un importante insumo que permite hacer análisis de detalle, que en este caso, permitió determinar la existencia de las dos grandes zonas. Como inconvenientes, se identifica que no contar con imágenes en periodos de tiempo regulares obliga a que sean utilizados otros elementos que afirmen la zonificación. Las imágenes SPOT, de alta resolución temporal, permitieron determinar la existencia de distintas áreas dentro del humedal. Para esto fue fundamental el análisis estadístico del comportamiento temporal de la serie de 11 años y 4 meses, demostrando que la base de datos generada a partir de las imágenes SPOT, son una herramientas de gran potencial para el monitoreo y evaluación de la situación de un humedal. En contrapartida se vio que dichas imágenes no aportan una resolución espacial óptima, dado que los píxeles poseen gran tamaño, haciendo que los límites entre zonas sean poco precisos. De igual forma, se considera que es más eficiente ganar resolución temporal en contrapartida a la resolución espacial, debido al potencial que representa la base de datos SPOT para establecer zonas y monitorear el ecosistema en periodos largos de tiempo.

La evolución temporal de las zonas y subzonas, mostró claramente el patrón temporal que siguen 5 de las 7 subzonas, dejando expuesto la existencia de dos subzonas que han tenido comportamiento diferente al resto, en las que se deberá concentrar esfuerzos en futuro para conocer que tipo de factores se encuentran regulándolas. A partir de la evolución se pudo comparar las productividades entre zonas, mostrando claramente la predominancia de la Este sobre la Oeste.

Del análisis de correlación entre el NDVI y las variables meteorológicas, temperatura y precipitación, se encontró que las mismas no presentaban relación, quedando demostrado que la producción de biomasa responde a un conjunto mayor de factores, entre los cuales posiblemente los vinculados al hidroperiodo, la cantidad de horas de sol y las contribuciones de energía en forma de nutrientes sean los más relevantes.

6. AGRADECIMIENTOS

A Marcel Achkar por las sugerencias, el tiempo, y la paciencia. A todos mis compañeros del LDSGAT, Anita, Gabriela, Ismael, Lucia, José, Viveka, Beatriz, Víctor, Fernando y Casilda, quienes me dieron su apoyo y motivación, y especialmente a Mauricio Ceroni por la información brindada. A Ricardo Cayssials por su apoyo constante a lo largo de toda mi carrera. A los integrantes de PROBIDES por facilitarme

el ingreso al área. A Iirina Capdepont y Carlos Céspedes por la información brindada y a Agustín Soto por sus aportes y por acompañarme en todo el proceso.

7. BIBLIOGRAFÍA

Achkar, M. et al (2003) Las Áreas Naturales Protegidas en Uruguay. El caso de los Humedales de Farrapos. Departamento de Río Negro. *L'Ordinaire Latino-americain*, 191 p 85-104 France. IPEALT. Université de Toulouse Le Mirail.

Achkar, M.; Faccio, C. (2008) *Propuesta de ingreso del área parque nacional laguna negra al sistema nacional de áreas protegidas*. Montevideo-Uruguay, Probides-Facultad de Ciencias. Informe Técnico S/P.

Aguado, I, Chuvieco, E., Salas, F. J., Cocero, D. y Riaño, D. (2001) Estimación del estado hídrico de la vegetación a partir de sensores de alta y baja resolución. *GeoFocus*. N° 1, p. 1-16.

Alonso, E.; Molina, B. (1996) *Cuadernos del Potrerillo de Santa Teresa*. Flora [Internet], Rocha-Uruguay, Probides. Disponible desde: < <http://www.probides.org.uy> > [Acceso Febrero de 2009].

Berlanga, C.; Ruiz, A. (2004) *Análisis comparativo de los sistemas clasificatorios de humedales* [Internet]. Instituto Nacional de Ecología, México. Disponible desde: <<http://www.ine.gob.mx/>>. [Acceso 2 de febrero 2009].

Boulé, M. E. (1994) *An early history of wetlands ecology*. En: Mitsch W. J.; *Global Wetlands: old world and new*. Ed. Elsevier Science B. V, p. 57-74.

Cabrera, A.; Willink A. (1980) *Biogeografía de América Latina*. Washington, D.C., Secretaria General de la Organización de los Estados Americanos.

Canevari, P.; Davison, I.; Blanco, D.; Castro, G.; Bucher, E. (2001) *Los Humedales de América del Sur: Una Agenda para la conservación de la Biodiversidad y las políticas de Desarrollo*. Wetlands Internacional.

Capdepont, I., Pintos, S. (2006) Manejo y aprovechamiento del medio por parte de los grupos constructores de montículos: cuencadela Laguna de Castillos, Rocha– Uruguay. *Relaciones de la Sociedad Argentina de Antropología*, 31. Buenos Aires, p. 117-132.

Cayssials, R.; Pérez, F.; Maneyro, R. (2002) *Pautas para la elaboración de un Plan de Manejo para el área de Esteros de Farrapos. Primera parte: Medio Físico y Fauna*. Montevideo-Uruguay, Facultad de Ciencias-DINAMA.

Céspedes, C. (1995) *Gestión ambiental de los humedales de la Cuenca de la Laguna Merín. El humedal de la Cuenca de la Laguna Merín: análisis y discusión para su reinterpretación*. Montevideo-Uruguay, CIEDUR Serie de investigaciones N°27.

CNES, (2010) *SPOT* [Internet], Francia. Disponible desde: < <http://smc.cnes.fr/SPOT> > [Acceso 25 de febrero de 2010]

Chuvieco, E. (1990) *Fundamentos de Teledetección*. España, ed. RIALP S.A.

Comisión Asesora Específica Provisoria del Área protegida Laguna de Rocha. (1998) *Propuesta de ingreso del área protegida Laguna de Rocha al Sistema Nacional de Áreas Protegidas*. Montevideo-Uruguay, MVOTMA-DINAMA.

Dahl, T. E.; Allord, G. J. (1997) *History of Wetlands in the Conterminous*. National Water Summary on Wetland Resource, [Internet], USA, United States, Paper 2425. Fish and Wildlife Service y U.S. Geological Survey. Disponible desde: <<http://water.usgs.gov/nwsum/WSP2425/history.htm>> [Acceso marzo de 2009]

Deambrosi, E. (1996) Plaguicidas utilizados en los cultivos de arroz. *Revista Arroz*. N° 7, Setiembre.

Delgado, E.; Eyji, E. (1998) *Sistemas de Informações Geograficas: Aplicações na Agricultura*. Brasilia-Brasil, ed. Embrapa SPI.

Dirección Nacional de Meteorología (2010) *El clima del Uruguay* [Internet] Montevideo-Uruguay. Disponible desde: <<http://www.meteorologia.com.uy>> [Acceso 7 de Julio de 2010]

Dugan, P. (1992) *Conservación de humedales: un análisis de temas de actualidad y acciones necesarias*. Suiza, UICN.

Durán, A; Silva, A; Ruiz, A. (1998) *Impacto productivo del cultivo de arroz sobre suelos de bañados: productividad y conservación*. Documentos de Trabajo N° 16. Rocha-Uruguay, Probides-Facultad de Agronomía.

Evia, G.; Gudynas, E. (2000) *Ecología del Paisaje*. Montevideo-Uruguay, DINAMA-Junta Nacional de Medio Ambiente-Junta de Andalucía- Consejería de Medio Ambiente.

Fernández, A.; Forni, F.; Maneyro, R.; Queirolo, D.; Rodríguez, R. (1995) *Cuadernos del Potrerillo de Santa Teresa. Mamíferos* [Internet], Rocha-Uruguay, Probides. Disponible desde: <<http://www.probides.org.uy>> [Acceso Febrero de 2009].

Frazier, S.; Moser, M; Prentice, C. (1996) *A Global Overview of Wetland Loss and Degradation* [Internet], Brisbane, Australia, Wetlands internacional-Ramsar Disponible desde: http://www.ramsar.org/about/about_wetland_loss.htm [Acceso diciembre 2008].

Forni, F.; Maneyro, R.; Santos, M. (1995) *Cuadernos del Potrerillo de Santa Teresa. Anfibios y reptiles* [Internet], Rocha-Uruguay, Probides. Disponible desde: <<http://www.probides.org.uy>> [Acceso Febrero de 2009].

Horta, S. (2002) *Diagnóstico ambiental de los bañados de carrasco: aplicación de un sistema de información geográfica*. Tesis de Grado, Universidad de la República.

IMM, (2000) *Flora Indígena*. Montevideo-Uruguay, Museo y Jardín Botánico Prof. Atilio Lombardo-IMM.

IMM. (2009) *Humedales del Santa Lucía* [Internet], Montevideo-Uruguay. Disponible desde: <http://www.montevideo.gub.uy/ambiente/humedales.htm> [Acceso 6 de febrero 2009].

Mitsch, W.; Gosselink, J. (2007) *Wetlands*. 4a Ed. New York, Wiley.

Moser M.; Prentice C.; Frazier S. (1996) *A Global Overview of Wetland Loss and Degradation* [Internet], Australia, Ramsar. Disponible desde: <http://www.ramsar.org/about/about_wetland_loss.htm> [Acceso marzo de 2009].

MGAP, Dirección de Suelos y Fertilizantes. (1976) *Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay. Tomo I, Clasificación de Suelos*. Ed. IGM, Montevideo-Uruguay.

MGAP. (1984) *Índices de productividad CONEAT*. Montevideo-Uruguay, MGAP.

MTOP. (2008) *Boletín informativo*. Nº 4, abril, MTOP, Montevideo-Uruguay.

MTOP, 2004. Información cartográfica digital de humedales del ministerio

Panario, D. (1988) *Geomorfología del Uruguay*. Montevideo-Uruguay, Departamento de Publicaciones- Facultad de Humanidades y Ciencias.

Panario, D. y Gutiérrez, O. (Comps) (1995) *Gestión ambiental de los humedales de la Cuenca de la Laguna Merín. Algunos efectos del cultivo del arroz en los agrosistemas*. Montevideo-Uruguay, CIEDUR Serie de investigaciones Nº121.

Paruelo, J.M. (2008) La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente*, 17 (3), setiembre 2008 p. 4-22.

Peña, J. (2008) *Sistemas de información geográfica aplicados a la gestión ambiental del Territorio*. 2a, España, ed. Club Universitario-Universidad de Alicante.

Pérez, C. (2001) *Técnicas estadísticas con SPSS*. España-Madrid, Universidad Complutense de Madrid, Pearson Educación, S.A..

Vegetation Programme (2010) *Vegetation programme [INTERNET]*. Disponible desde: <http://www.spot-vegetation.com> [Acceso febrero de 2010]

Retamosa, M.; Rudolf, J.; Santos, M.; Umpiérrez, S. (1996) *Cuadernos del Potrerillo de Santa Teresa*. Aves [Internet], Rocha-Uruguay, Probides. Disponible desde: <<http://www.probides.org.uy>> [Acceso Febrero de 2009].

Ramsar a. (2008) *Listado de humedales con importancia internacional* [Internet], Suiza, Ramsar. Disponible desde: < http://www.ramsar.org/key_sitelist.htm> [Acceso marzo de 2009].

Ramsar b. (2008) *Que son los humedales. Documento informativo Nº 1* [Internet], Suiza, Ramsar. Disponible desde: <En http://www.ramsar.org/index_list.htm.> [Acceso marzo de 2009]

Ramsar c. (1996) *Sistemas de clasificación de tipos de humedales* [Internet]. Suiza, Ramsar Disponible desde: <En http://www.ramsar.org/ris/key_ris_types_s.htm> [Acceso febrero de 2009].

Ramsar d. (2000) *Los humedales, valores y funciones: Reservorios de Biodiversidad* [Internet]. Suiza, Ramsar. Disponible desde: <http://www.ramsar.org/info/values_intro_s.htm> [Acceso diciembre de 2009].

Ramsar e. (2000) *Los humedales, valores y funciones: Reposición de aguas*

subterráneas. [Internet]. Suiza, Ramsar. Disponible desde: <http://www.ramsar.org/info/values_intro_s.htm> [Acceso diciembre de 2009].

Ramsar f Dwight Peck. (2007) *La jerga de Ramsar*. [Internet]. Suiza, Ramsar. Disponible desde: http://www.ramsar.org/about/about_glossary_s.htm#glossary [Acceso marzo de 2009].

Reddy, R., y DeLaune, R. (2008) *Biogeochemistry of wetlands; Science and Applications*. USA, Taylor & Francis Group.

SNAP a. (S/F) *Parque nacional Lacustre y área de uso múltiple* [Internet]. Montevideo-Uruguay, MVOTMA-DINAMA Disponible en: http://www.mvotma.gub.uy/dinama/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=103&limit=5&limitstart=15&order=date&dir=DESC&Itemid=200 [Acceso marzo de 2009].

SNAP b. (S/F) *Monumento Natural de Dunas y Costa Atlántica*. Consultado 2008. *múltiple* [Internet]. Montevideo-Uruguay, MVOTMA-DINAMA Disponible en: http://www.mvotma.gub.uy/dinama/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=103&limit=5&limitstart=15&order=date&dir=DESC&Itemid=200 [Acceso marzo de 2009].

SNAP c. (S/F) *Bases para la formulación del plan de manejo del área protegida Esteros de Farrapos e Islas del Río Uruguay*. [Internet]. Montevideo-Uruguay, MVOTMA-DINAMA Disponible en: http://www.mvotma.gub.uy/dinama/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=103&limit=5&limitstart=15&order=date&dir=DESC&Itemid=200 [Acceso marzo de 2009].

StatSoft, Inc. (2004). *STATISTICA Electronic Manual*. STATISTICA (data analysis software system), version 7. Estados Unidos.

UNESCO. (1982) *Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur*. Montevideo-Uruguay, Oficina Regional de la Ciencia y la Tecnología de la UNESCO para América Latina y el Caribe.

Tucker, C. (1979) Red and Photographic Infrared linear Combinations for Monitoring Vegetation *Remote sensing of environment* (8) p. 127-150

Varese, J. A. (2001) *Rocha, tierra de aventuras*. Montevideo-Uruguay, Banda Oriental.

Williams, M. (1991) *Wetlands: A threatened Landscape*. USA, Institute of British Geographers

Anexos

Anexo 1. Sistemas de clasificación de Humedales

Tabla 1. Clasificación de humedales y hábitats de aguas profundas, Cowardin Carter, Golet y La Roe, 1979.

MARINO	SBMAREAL	FONDOS ROCOSOS
		Fondos no consolidados
		Lechos acuáticos
	INTERMAREAL	Arrecifes
		Lechos acuáticos
		Arrecifes
ESTUARINO	SUBMAREAL	Litoral rocoso
		Litoral no consolidado
		Fondos rocosos
		Fondos no consolidados
		Lechos acuáticos
		Arrecifes
		Arrecifes
	INTERMAREAL	Streambed
		Litoral rocoso
		Litoral no consolidado
		Humedal emergente
		Humedal arbustivo
		Humedal boscoso
		Humedal boscoso
RIBEREÑO	MAREAL	Fondos rocosos
		Fondos no consolidados
		Lechos acuáticos
		Streamland
		Litoral rocoso
		Litoral no consolidado
		Humedal emergente
		Fondos rocosos
		Fondos no consolidados
	PERMANENTE INFERIOR	Lechos acuáticos
		Litoral rocoso
		Litoral no consolidado
		Humedal emergente
		Fondos rocosos
		Fondos no consolidados
	PERMANENTE SUPERIOR	Lechos acuáticos
		Litoral rocoso
		Litoral no consolidado
		Streambed
		Fondos rocosos
		Fondos no consolidados
LACUSTRE	LIMNÉTICO	Lechos acuáticos
		Fondos rocosos
		Fondos no consolidados
	LITORAL	Lechos acuáticos
		Litoral rocoso
		Litoral no consolidado
		Humedal emergente
		Fondos rocosos
		Fondos no consolidados
		Lechos acuáticos
PALUSTRE	Litoral no consolidado	
	Humedal de musgo -liquen	
	Humedal emergente	
	Humedal matorral arbustivo	
	Humedal boscoso	
	Humedal boscoso	
	Fondos rocosos	
	Fondos no consolidados	

Tabla 2. Sistemas de clasificación de tipos de humedales, Ramsar, 1996.

SISTEMA DE CLASIFICACION DE HUMEDALES-RAMSAR TOMADO DE RAMSAR					
Humedales Marinos y Costeros		Humedales Continentales		Humedales Artificiales	
	<i>Aguas marinas someras permanentes:</i> en la mayoría de los casos de menos de seis metros de profundidad en marea baja; se incluyen bahías y estrechos		<i>Deltas interiores</i> (permanentes).		<i>Estanques de acuicultura:</i> (por Ej. estanques de peces y camaronerías)
	<i>Lechos marinos submareales:</i> se incluyen praderas de algas, praderas de pastos marinos, praderas marinas mixtas tropicales		<i>Ríos/arroyos permanente:</i> incluye cascadas y cataratas		<i>Estanques artificiales:</i> incluye estanques de granjas, estanques pequeños (generalmente de menos de 8ha).
	<i>Arrecifes de coral</i>		<i>Ríos/arroyos estacionales/intermitentes/irregulares</i>		<i>Tierras de regadío:</i> incluye canales de regadío y arrozales
	<i>Costas marinas rocosas:</i> incluye islotes rocosos y acantilados		<i>Lagos permanentes de agua dulce:</i> (de más de 8ha); incluye grandes madre viejas (meandros o brazos muertos de río).		<i>Tierras agrícolas inundadas estacionalmente:</i> incluye praderas y pasturas inundadas utilizadas de manera intensiva
	<i>Playas de arena o de guijarros:</i> incluye barreras, bancos, cordones, puntas e islotes de arena; incluye sistemas y hondonales de dunas		<i>Lagos estacionales/intermitentes de agua dulce:</i> (de más de 8ha); incluye lagos en llanuras de inundación		<i>Zonas de explotación de sal:</i> salinas artificiales, salineras, etc.
	<i>Estuarios:</i> aguas permanentes de estuarios y sistemas estuarinos de deltas		<i>Lagos permanentes salinos/salobres/alcalinos</i>		<i>Áreas de almacenamiento de agua:</i> reservorios, diques, represas hidroeléctricas, estanques artificiales (generalmente de más de 8 ha).
	<i>Bajos intermareales de lodo, arena o con suelos salinos</i> ("saladillos").		<i>Lagos y zonas inundadas estacionales/intermitentes salinos/salobres/alcalinos</i>		<i>Excavaciones:</i> canteras de arena y grava, piletas de residuos mineros
	<i>Pantanos y esteros:</i> (zonas inundadas) intermareales; incluye marismas y zonas inundadas con agua salada, praderas halófilas, salitrales, zonas elevadas inundadas con agua salada, zonas de agua dulce y salobre inundadas por la marea		<i>Pantanos/esteros/charcas permanentes salinas/salobres/alcalinos</i>		<i>Áreas de tratamiento de aguas servidas:</i> "sewage farms", piletas de sedimentación, piletas de oxidación
	<i>Humedales intermareales arbolados:</i> incluye manglares, pantanos de "nipa", bosques inundados o inundables mareales de agua dulce		<i>Pantanos/esteros/charcas estacionales/intermitentes salinos/salobres/alcalinos</i>		<i>Canales de transportación y de drenaje, zanjas</i>
	<i>Lagunas costeras salobres/salada:</i> lagunas de agua entre salobre y salada con por lo menos una		<i>Pantanos/esteros/charcas permanentes de agua dulce:</i> charcas (de menos de 8 ha), pantanos y esteros sobre suelos inorgánicos, con vegetación emergente en agua por lo menos durante la mayor parte del período		<i>Sistemas kársticos y otros sistemas hídricos subterráneos:</i> artificiales

	relativamente angosta conexión al mar		de crecimiento		
	<i>Lagunas costeras de agua dulce:</i> incluye lagunas deltaicas de agua dulce		<i>Pantanos/esteros/charcas estacionales/intermitentes de agua dulce sobre suelos inorgánicos:</i> incluye depresiones inundadas (lagunas de carga y recarga), "potholes", praderas inundadas estacionalmente, pantanos de ciperáceas.		
	<i>Sistemas kársticos y otros sistemas hídricos subterráneos:</i> marinos y costeros		<i>Turberas no arboladas:</i> incluye turberas arbustivas o abiertas ("bog"), turberas de gramíneas o carrizo ("fen"), bofedales, turberas bajas		
			<i>Humadales alpinos/de montaña:</i> incluye praderas alpinas y de montaña, aguas estacionales originadas por el deshielo		
			<i>Humadales de la tundra:</i> incluye charcas y aguas estacionales originadas por el deshielo		
			<i>Pantanos con vegetación arbustiva:</i> incluye pantanos y esteros de agua dulce dominados por vegetación arbustiva, turberas arbustivas ("carr"), arbustales de <i>Alnus sp</i> ; sobre suelos inorgánicos		
			<i>Humadales boscosos de agua dulce:</i> incluye bosques pantanosos de agua dulce, bosques inundados estacionalmente, pantanos arbolados; sobre suelos inorgánicos		
			<i>Turberas arboladas:</i> bosques inundados turbosos		
			<i>Manantiales de agua dulce, oasis</i>		
			<i>Humadales geotérmicos</i>		

Nota: "**llanuras de inundación**" es un término utilizado para describir humadales, generalmente de gran extensión, que pueden incluir uno o más tipos de humadales, entre los que se pueden encontrar R, Ss, Ts, W, Xf, Xp, y otros (vegas/praderas, savana, bosques inundados estacionalmente, etc.). No es considerado un tipo de humedal en la presente clasificación. (Ramsar³, 2008)