



Tesis de grado Licenciatura en Geografía

**Identificación de áreas prioritarias para el control de la
forestación en el sistema de dunas del
Parque Nacional Cabo Polonio**



Imagen: Maximiliano Sena

Autor: Manuel Pisciotano Pucci

Tutor: Dr. Ismael Díaz

Co-tutor: Dr. David Romero

Tribunal: Msc. Gabriela Fernández

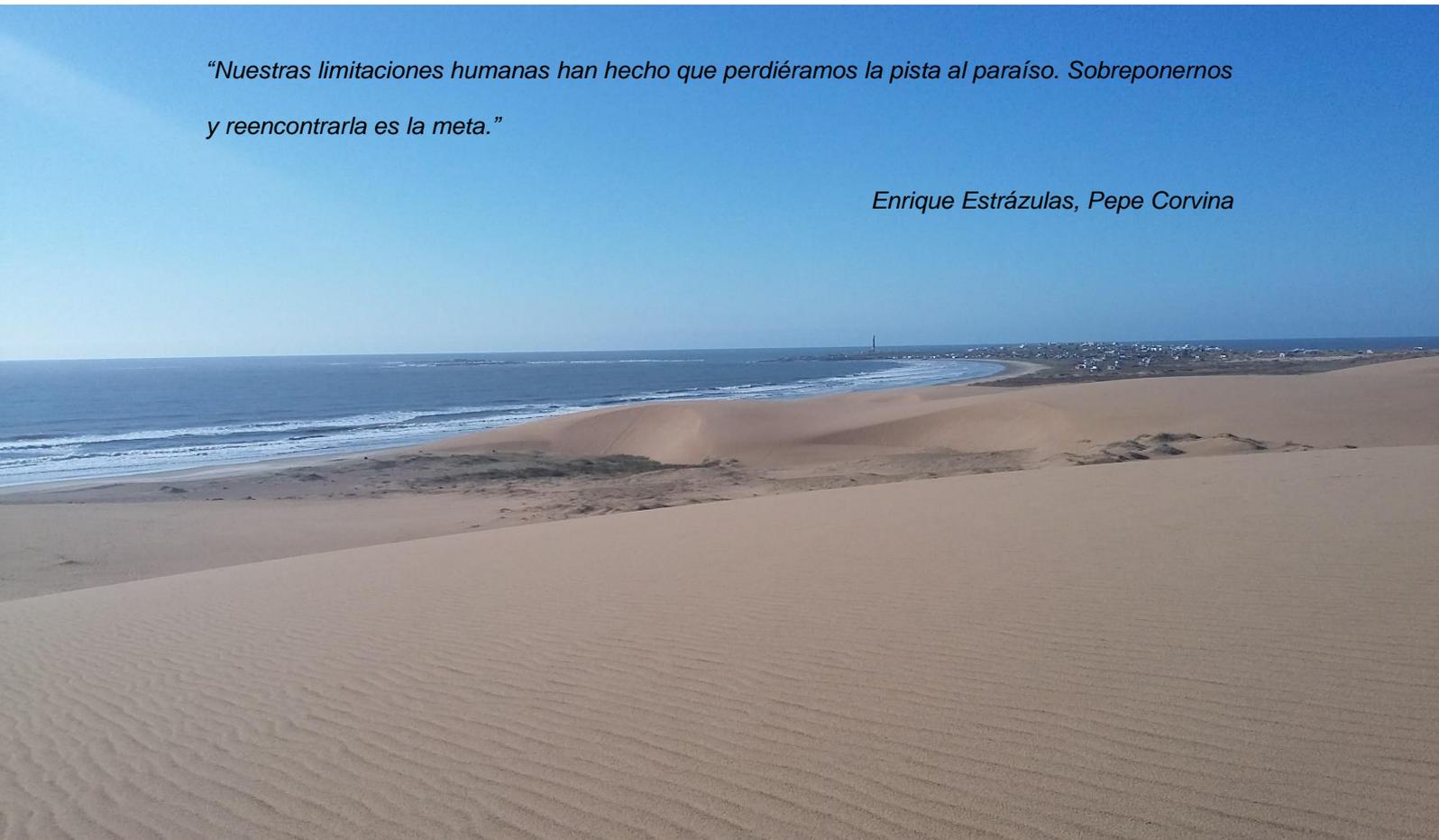
Dr. José Carlos Guerrero

Montevideo, Uruguay

16/4/2020

“Nuestras limitaciones humanas han hecho que perdiéramos la pista al paraíso. Sobreponernos y reencontrarla es la meta.”

Enrique Estrázulas, Pepe Corvina



Agradecimientos

Agradezco a mis tutores Ismael Díaz y David Romero, por haberme guiado en el trabajo y por la paciencia que me tuvieron.

A Gustavo Piñeiro, por el conocimiento transmitido y por estar siempre dispuesto a responder mis preguntas.

A Daniel Panario y Ofelia Gutiérrez, que por su experiencia y conocimiento de la temática y el área de estudio han sido fundamentales en este trabajo.

A Gabriela Fernández y José Carlos Guerrero, por la ayuda durante toda la carrera y por aceptar ser parte del tribunal.

A la FAU (Fuerza Aérea Uruguaya), por brindarme las imágenes aéreas.

A mis compañeros y compañeras de facultad por lo compartido en todo este largo tiempo, en especial a Agustín (el morrón) Urtiaga por la fuerza en esta última etapa y a las gurisas de la república que me aguantaron la cabeza.

A todas las casas de estudiantes de Brasil, en especial a la CEU de Porto Alegre, por permitirme haber vivido una experiencia única para mi formación.

Agradezco especialmente a mi familia: Mi madre, padre, hermanos, sobrino, cuñadas, cuñado, suegra, suegro y toda la flota de primos, primas, tíos y tías, por todo el cariño y aguante recibido en este proceso.

A mi abuela y abuelo, por haber elegido la localización exacta.

A Loli, por acompañarme y aportar en la tesis.

ÍNDICE

Resumen.....	6
Introducción.....	7
Justificación.....	11
Objetivos	15
Objetivo general.....	15
Objetivos específicos.....	15
Materiales y métodos	15
Área de estudio.....	15
Caracterización socio-económica	17
Ambientes presentes en el área	17
Sistemas de dunas	19
Altimetría.....	21
Estrategia metodológica.....	22
Digitalización de la cobertura del suelo.....	23
Clasificación de la cobertura vegetal y de dunas.....	23
Identificación de zonas con mayor fragilidad en el sistema de dunas	24
Modelo de distribución de la forestación.....	26
Presencia/ausencia de forestación en el área de estudio	26
Elaboración de variables predictoras.....	27
Selección de variables.....	31
Proceso de modelación	31
Evaluación del modelo	32
Identificación de áreas prioritarias para el control de la forestación	33

Resultados	34
Cambios en el sistema de dunas.....	34
Evolución espacial de la forestación.....	36
Modelo de favorabilidad.....	38
Evaluación del modelo.....	38
Variables significativas en el modelo forestación.....	39
Zonas de favorabilidad en el modelo forestación.....	40
Variables significativas en el modelo dispersantes.....	41
Zonas de favorabilidad en el modelo dispersantes.....	43
Áreas prioritarias para el control de la forestación.....	44
Discusión.....	45
Cambios en el área de estudio.....	45
Modelación a través de la función de favorabilidad.....	47
Áreas prioritarias para el manejo.....	49
Conclusiones.....	52
Perspectivas a futuro.....	53
Bibliografía	54

RESUMEN

El sistema dunar de Cabo Polonio constituye un paisaje único y singular en la costa uruguaya donde la forestación con especies exóticas realizada entre las décadas de 1940 y 1980 produjo una afectación en el equilibrio sedimentario y una transformación radical del ecosistema. La integración de estrategias metodológicas como los sistemas de información geográfica (SIG), la teledetección y la modelación de especies ofrecen una alta potencialidad para analizar estos procesos y generar información para la definición de medidas de gestión. El objetivo de este trabajo fue identificar zonas prioritarias para el control de la forestación en el sistema de dunas, como insumo para contribuir a la gestión y conservación del Parque Nacional Cabo Polonio. La estrategia de investigación integró tres etapas: 1) clasificación y delimitación de la cobertura del suelo y de los sistemas de dunas; 2) elaboración de un modelo de distribución predictivo para determinar las zonas favorables para el establecimiento de la forestación en el área; y 3) identificación de zonas prioritarias para el control de la forestación dentro del Parque Nacional. Los resultados marcan un deterioro en el sistema de dunas al registrarse una menor cantidad de arena en el sistema. La forestación marcó un avance continuo hacia el sistema dunas, aumentando un 80% el área con vegetación dispersa en el período 2000-2015. Las zonas de mayor favorabilidad obtenidas en los modelos se ubican próximas a la masa forestal consolidada y presentan un gradiente hacia la costa, distribuyéndose principalmente en tres zonas: norte del área dentro del sistema Buena Vista y al norte del sistema Cabo Polonio; inicio del sistema de dunas; y finalmente en los alrededores del camino principal de ingreso al área. Por otra parte, las variables que más explicaron la distribución de la forestación fueron la superficie de arena, la altura y la distancia al bañado. Las zonas con mayor prioridad fueron las que resultaron de favorabilidad media o alta y se encuentran a barlovento en el sistema de dunas cabo polonio. Se concluye que el diseño e implementación de medidas para la erradicación de esta vegetación exótica, es clave para no comprometer la singularidad del área. La definición de áreas prioritarias pretende ser un aporte en este sentido, siendo un paso fundamental en la erradicación de la forestación.

Palabras clave: SIG, teledetección, modelación de especies, sistemas de dunas, áreas protegidas

1. INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras constituyen áreas de transición entre la tierra y el mar en donde el uso de la tierra está directamente relacionado con las condiciones ecológicas marinas (Price y Humphrey, 1993). Estos ecosistemas naturales presentan poca capacidad para soportar alteraciones antrópicas (Ruberti et al., 2018). La ocupación de la zona costera por parte de los seres humanos data de miles de años en algunas zonas, con un crecimiento exponencial en los últimos siglos debido a los avances tecnológicos (Nordstrom, 2004). Esta presión antrópica está ocasionando cambios sustanciales para el ecosistema de costa.

La configuración geomorfológica de la costa está relacionada con las variaciones del nivel mar y el consecuente desplazamiento de la línea de costa. Su actual disposición está determinada por variaciones climáticas y del nivel del mar características del holoceno que dieron origen a las geoformas litorales: lagunas costeras, playas, sistemas de dunas, etc. (Richiano et al., 2012). Los sistemas dunares litorales tienen la particularidad de ser uno de los ambientes más frágiles y vulnerables a sufrir una alteración en su dinámica natural, en donde las acciones humanas han tenido gran protagonismo en los cambios producidos (Hernandez Calvento, 2002). Desde un punto de vista funcional, las dunas representan las reservas de arenas de las playas y juegan un papel importante en el equilibrio de las mismas. A su vez, son reguladoras de la dinámica de estuarios, marismas y lagunas litorales. También encierran una gran biodiversidad de especies, y un interés paisajístico y recreativo de relevancia (Ley et al., 2007). Estos sistemas dunares responden a un equilibrio

característico de un gran volumen de arena que movilizado por el oleaje y las corrientes marinas alcanzan una gran planicie donde los sedimentos se secan y movilizados por el viento avanzan sobre el continente en forma de dunas (Hernandez Calvento, 2002).

Los sistemas dunares presentan características que los diferencian de otros ecosistemas, destacándose la movilidad de sus materiales y de las geoformas y los cortos intervalos en que se producen estos cambios. Estos aspectos inciden en la vegetación, la cual está condicionada por la movilidad de los sedimentos, que a su vez está condicionada por la presencia de la vegetación (Hernández et al., 2008). Esta dinámica, sedimentos-vegetación, es de gran importancia en la estabilización de las dunas al ser un freno a la erosión eólica y un elemento de fijación de granos de arena por retención de la velocidad del flujo de viento (Hernandez Calvento, 2002).

En los campos de dunas el avance se da por la erosión de los granos en la cara a barlovento (incidencia directa del viento) seguida de una sedimentación en la cara a sotavento (Trujillo Vera, 2018). De esta manera, la dinámica de las dunas transversales se altera una vez que la vegetación se arraiga en la zona a barlovento, no permitiendo la deposición de los sedimentos en la zona a sotavento, cambiando así el perfil de la duna de convexo a cóncavo y aumentando su tasa de erosión (Tsoar y Blumberg, 2002). De esta forma, las zonas a barlovento en las dunas transversales juegan un rol fundamental y no deberían estar fijada por ningún factor, de lo contrario se generaría una detención del movimiento dunar que no permitiría el normal funcionamiento del sistema (SNAP, 2019).

A lo largo de la historia ha predominado una visión productivista que considera a los espacios costeros, sobre todo a los sistemas dunares, como áreas improductivas e infértiles. A su vez estos arenales constituían una amenaza ya que se desplazaban sobre chacras y carreteras e impedían el acceso a distintos lugares, es por esto que se comenzó con la introducción de especies vegetales para su fijación (Ley et al., 2007).

Al fijarse estos espacios por medio de la forestación, se generan cambios importantes en la dinámica de los sedimentos, muchas veces generando procesos erosivos severos en las playas. Es importante remarcar que la interrupción en la dinámica de los sistemas dunares puede influir en lugares distantes al lugar de origen donde se ha cortado el suministro de arena (De Álava y Panario, 1996). De esta manera la afectación de los sistemas de dunas en la mayoría de los casos genera cambios importantes en la totalidad del sistema costero. Además la introducción de especies vegetales con los fines anteriormente mencionados genera impactos en los sistemas dunares que conllevan a una pérdida de su valor escénico y paisajístico.

Debido a lo expuesto anteriormente, se torna imprescindible conocer la evolución de la vegetación en los sistemas dunares de manera de poder establecer pautas de manejo que colaboren en la conservación de estos sistemas. El análisis de las geoformas y de los espacios interdunares permite realizar una aproximación al comportamiento geomorfológico del sistema, ya que las formas dunares derivan de la disponibilidad de sedimentos y de la existencia de vientos movilizadores. Cambios en las geoformas estarían indicando cambios en alguno de estos parámetros.

La fragilidad de un ambiente, entendida como su capacidad de soportar acciones potencialmente alteradoras sin variar su cualidad, está relacionada con las condiciones abióticas donde se desarrolla, tales como el grado de inclinación de la pendiente, el riesgo de erosión o el régimen climático (Tamanini, 2008). Desde la perspectiva de la zonificación de un territorio, identificar áreas frágiles significa ubicar las zonas más propensas a modificar los atributos biogeofísicos de un área (Cortés y Calva, 2011). Identificar estas áreas puede ser un importante insumo en estudios de zonificación ambiental (Andrade et al., 2010).

Diversos autores demuestran que la integración de estrategias metodológicas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), la teledetección y la modelación de la distribución de las especies son una herramienta de alta potencialidad para analizar estos procesos y generar información para la definición de medidas de gestión más precisas y adecuadas (García y Vallejo, 2012; Fernandes y Amaral, 2013; Ruiz García, 2016).

El análisis de fotografías aéreas es la técnica de mayor tradición en los estudios de dunas. La posibilidad de utilizar una fuente de información continua para el espacio de estudio y la visualización tridimensional del relieve a través de técnicas estereoscópicas hizo que sea una fuente de información insustituible en el estudio de los sistemas dunares. Los datos proporcionados por sensores remotos son una fuente de información crítica para algunas disciplinas, la utilidad en el estudio de sistemas dunares es muy dependiente de las características del sensor. Sin embargo, un elevado conjunto de estudios sobre sistema de dunas fueron sustentados con la teledetección, ya sea para la

caracterización morfométrica o para el estudio de sus propiedades físicas (Sanjaume y Gracia, 2011).

La elaboración de modelos de distribución espacial sobre los espacios ocupados por las especies son una técnica que mediante diferentes procedimientos estadísticos permiten inferir las condiciones idóneas para la presencia de un organismo en función de las características ambientales del territorio (Mateo et al., 2012). Estos modelos se presentan como instrumentos esenciales en la conservación, ayudando a entender la relación de las especies con el ambiente donde se desarrollan y permitiendo definir medidas y estrategias para una mejor gestión del territorio (Guisan y Zimmermann, 2000). Una de las herramientas utilizadas en la modelación espacial es el algoritmo de la Función de Favorabilidad (FF), la cual fue desarrollada como una forma de calcular el grado en que un ambiente es favorable para la presencia de una especie. La ventaja de este algoritmo es que proporciona un resultado independiente de la prevalencia de cada variable en el área de estudio (Romero, 2014).

1.1. Justificación

El sistema dunar de Cabo Polonio constituye un paisaje único y singular en la costa uruguaya, por sus “condiciones naturales inalteradas, de características relevantes y excepcionales para el país” fueron nombradas en el año 1966 Monumento Natural de Dunas y Costa Atlántica (Caldevilla y Quintillán, 2002), y ha sido por su singularidad, identificado como objeto focal de conservación en

el decreto de ingreso del área de Cabo Polonio al Sistema Nacional de Área Protegidas en 2009 (MVOTMA, 2009).

Con el fin de fijar las dunas, ya que estas constituían un problema por su avance sobre la ruta 10, se desarrolló una forestación masiva en el área con especies de *Pinus* (*P. pinaster*, *P. taeda*, *P. ellioti*, *P. radiata*) y *Acacia longifolia*. El comienzo de este proceso se remonta al año 1937 y para el año 1942 llegó a alrededor de 500 hectáreas forestadas de pino marítimo (Cortazzo, 2012). En 1966 se retoma la forestación y en la década del setenta se acentúan los trabajos aumentando el área total sembrada. Desde 1978 el crecimiento de esta forestación fue por expansión de este bosque introducido y de las especies asociadas en particular la Acacia, la cual por su gran adaptabilidad para desarrollarse en suelos arenosos ocupó amplias zonas de dunas (Maderni, 2007). Actualmente, el bosque implantado ocupa aproximadamente 1.300 Hectáreas, 25% del área de estudio (Figura 1). Esta vegetación es la responsable de la retención de arenas voladoras del sistema dunar (Cortazzo, 2012).

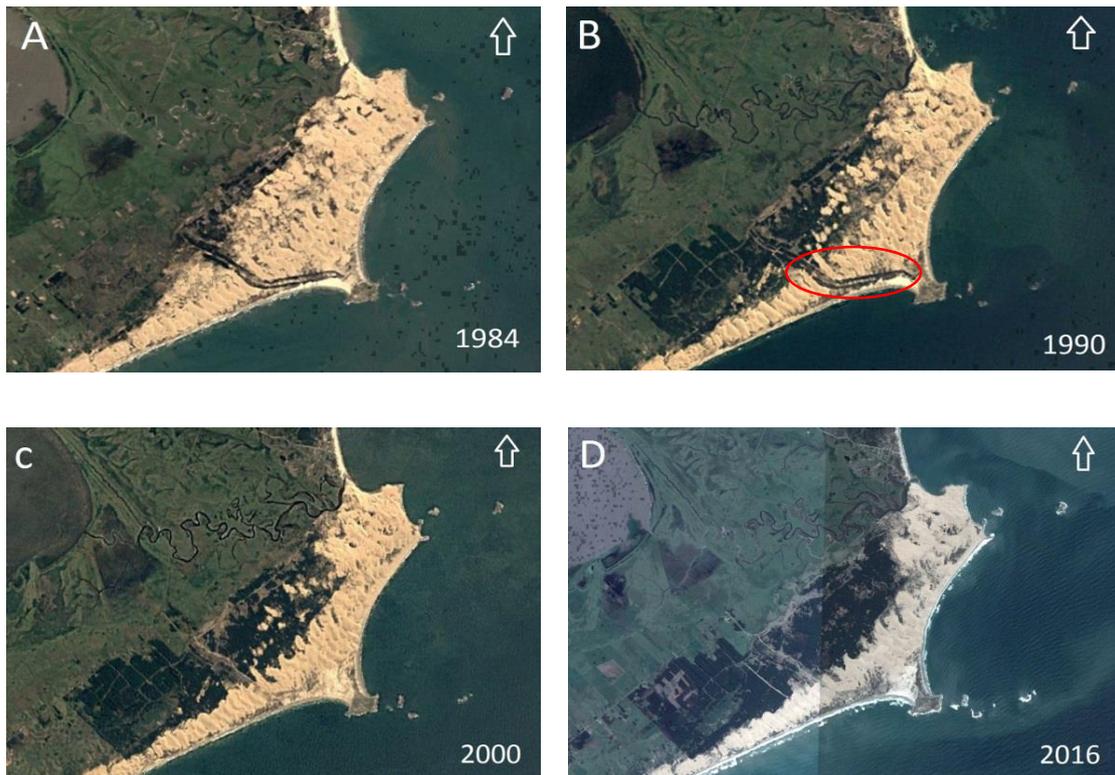


Figura 1. Variación espacio-temporal del bosque forestal implantado. A) 1984. Se puede identificar la barrera de Acacias plantada en sentido NO – SE para generar un camino de entrada al área (señalada en rojo) y el comienzo del crecimiento del bosque implantado con pinos. B) 1990. Se consolida el bosque de pinos. C) 2000. Ya no se ve la barrera de acacias retirada en 1992. D) 2016. Se puede ver la dispersión del bosque forestal en casi todo el frente de forestación. Imágenes extraídas de Google Earth. Elaboración: Manuel Pisciotano

Esta alteración trae aparejada la afectación en el equilibrio sedimentario existente entre el sistema de dunas y las playas ya que la retención de arenas en el campo de dunar contribuyó a la disminución de aportes y por lo tanto aumentar su proceso de erosión (Panario et al.,1993). A su vez la forestación sobre el campo de dunas llevó a una transformación radical del ecosistema (Cortazzo, 2012).

La principal causa de alteración de la dinámica del campo de dunas fue la introducción de una barrera forestal de acacias plantada para poder hacer un

camino de ingreso hacia Cabo Polonio (Panario et al.,1993) (Figuras 1A y 1B). Este proceso de alteración fue estudiado por Panario y Gutiérrez (2005) donde detectaron cambios en la morfología dunar como es la pérdida de convexidad en la cara a barlovento (parabolización de dunas), una disminución de altura de las dunas y un aumento de distancia entre las mismas.

Esta cortina de acacias fue retirada en el año 1992 (Caldevilla y Quintillán, 2002), teniendo efectos positivos en la dinámica sedimentaria de las dunas, sin embargo al no tomarse las medidas necesarias de reconstrucción se generó un área de deflación de arena desde la playa hacia el continente (Panario y Gutierrez, 2005). Esta arena se está perdiendo del sistema playa, llegando actualmente a atravesar el tómbolo (Panario y Gutiérrez, 2005). Por otra parte, en el momento de la plantación se introdujo *Cynodon dactylon* “pasto bermuda” que provocó el empastamiento en las zonas al abrigo de la cortina (Caldevilla y Quintillán, 2002).

Debido lo anteriormente expuesto, es necesario tener información acerca del estado actual del sistema de dunas para tomar medidas adecuadas en relación al control de la forestación, y la protección del sistema de dunas. A su vez conocer cómo se puede comportar a futuro este sistema sería un insumo necesario para la gestión del Parque Nacional Cabo Polonio. De esta manera, la presente tesis pretende responder:

¿Es posible identificar una heterogeneidad espacial dentro del sistema de dunas en cuanto a su funcionalidad y las amenazas existentes?

¿Es posible conocer un escenario futuro tanto para la distribución de la forestación como para el estado de conservación del sistema de dunas?

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

- Identificar áreas prioritarias para el control de la forestación sobre el sistema de dunas con la finalidad de contribuir a la gestión del Parque Nacional Cabo Polonio.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar el avance de la forestación e identificar la evolución del sistema de dunas para el período 2000-2015 a través del análisis de fotografías aéreas e imágenes satelitales;
- Identificar las zonas de mayor fragilidad en el sistema de dunas en función de su morfología y su ubicación espacial;
- Caracterizar la distribución de áreas potenciales favorables para la forestación y conocer las variables que explican su configuración espacial actual a partir de los modelos de distribución de las especies.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

El área de estudio se encuentra en la costa atlántica del departamento de Rocha. El área terrestre tiene una superficie aproximada de 5.000 ha y sus límites son al noroeste la ruta nacional N° 10, al norte el arroyo Valizas, al este y sur el océano atlántico y al sureste del padrón N° 1577 (MVOTMA, 2009) (Figura 2).

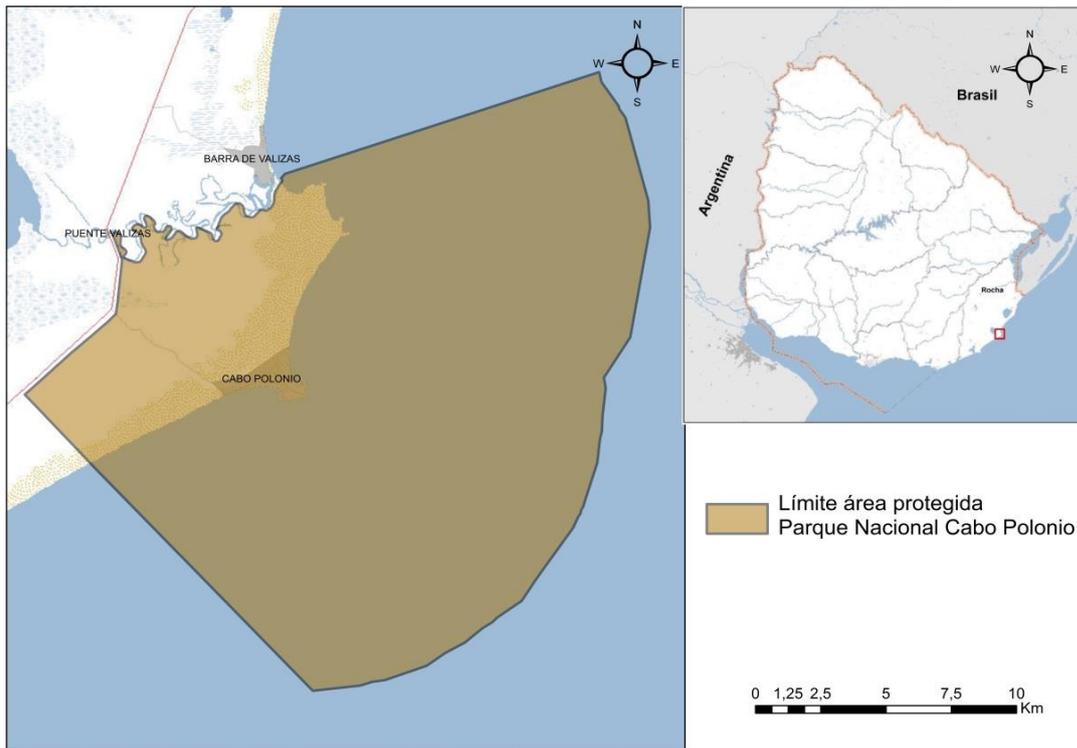


Figura 2. Límites del Parque Nacional Cabo Polonio. Elaboración: Manuel Piscittano

Esta zona forma parte de la reserva de Biosfera Bañados del Este, incorporada a la red de reservas del Programa el Hombre y la Biosfera de UNESCO en 1976 y del sitio Ramsar designado en 1981 (MVOTMA, 2009).

En 1997 el Programa de Conservación de la Biodiversidad y Desarrollo Sustentable de los Humedales del Este (PROBIDES) incluye el área protegida Cabo Polonio como parte de lo que denominó “Parque Nacional Laguna de Castillos” (SNAP, 2019).

En 2009 se aprobó la delimitación del área protegida Cabo Polonio ingresando al SNAP bajo la categoría de Parque Nacional (MVOTMA, 2009). En febrero de 2019 se aprueba el plan de manejo (SNAP, 2019).

3.1.1. Caracterización socio-económica

Cabo Polonio fue un enclave productivo centrado en la explotación lobera desde mediados del siglo XIX, existiendo esta actividad hasta principios de la década de 1990. A partir de la década del 70 y debido a una mejora en la accesibilidad al área, comenzó un turismo incipiente que termina de establecerse en las dos últimas décadas del siglo XX con la aparición de vehículos todo terreno, lo cual sumado a la prohibición de la lobería consolida a Cabo Polonio como un enclave turístico (SNAP, 2010).

En la actualidad, el turismo es la principal fuente de ingreso de pobladores permanentes y no permanentes del área, siendo enero y febrero el momento en el cual se registra la mayor afluencia de turistas (IMR, 2018).

Existe una única senda de acceso público vehicular en el área que atraviesa de noroeste a sureste el sistema dunar Cabo Polonio (Figura 3), por otra parte, la sociedad anónima GABASOL S.A realizó tareas de camino independiente a la senda de acceso general para el ingreso de vehículos privados para pobladores permanentes y no permanentes del área (Cortazzo, 2012).

3.1.2. Ambientes presentes en el área

El Parque Nacional Cabo Polonio es una zona marino-costera con gran influencia tanto del sistema terrestre como el marino. A su vez los ecosistemas asociados a cuerpos de agua y planicies de inundación (Laguna de Castillos – Arroyo Valizas) hacen que dentro del área de estudio podamos encontrar una

gran diversidad de ambientes. Entre los más destacados se encuentran el bosque y matorral psamófilo, el cual es un ambiente relictual donde se encuentran especies vegetales adaptadas a las condiciones de crecimiento de suelos arenosos (Rios, 2007). Las praderas se desarrollan en una franja paralela a la costa y a una cierta distancia de la misma, muchas veces permaneciendo inundadas la mayor parte del año, en algunos sectores esta se encuentra modificada por actividades agrícolas o forestales (MVOTMA, 2009). Las playas se caracterizan por ser arcos arenosos limitados por puntas rocosas graníticas, las cuales albergan gran variedad de invertebrados, peces, aves y mamíferos marinos. Ambas playas son de características disipativas en las proximidades del centro poblado, tendiendo a ser reflectivas a medida que aumenta la distancia al cabo (Panario et al, 1993). El área se caracteriza por presentar una gran cantidad de bañados costeros, los mismos se caracterizan por ser tierras sumergidas en forma permanente o la mayor parte del año por lo que su vegetación típica está compuesta por especies hidrófitas emergentes de alto porte (juncales, espadañales y pajonales) (MVOTMA, 2009) (Figura 3).

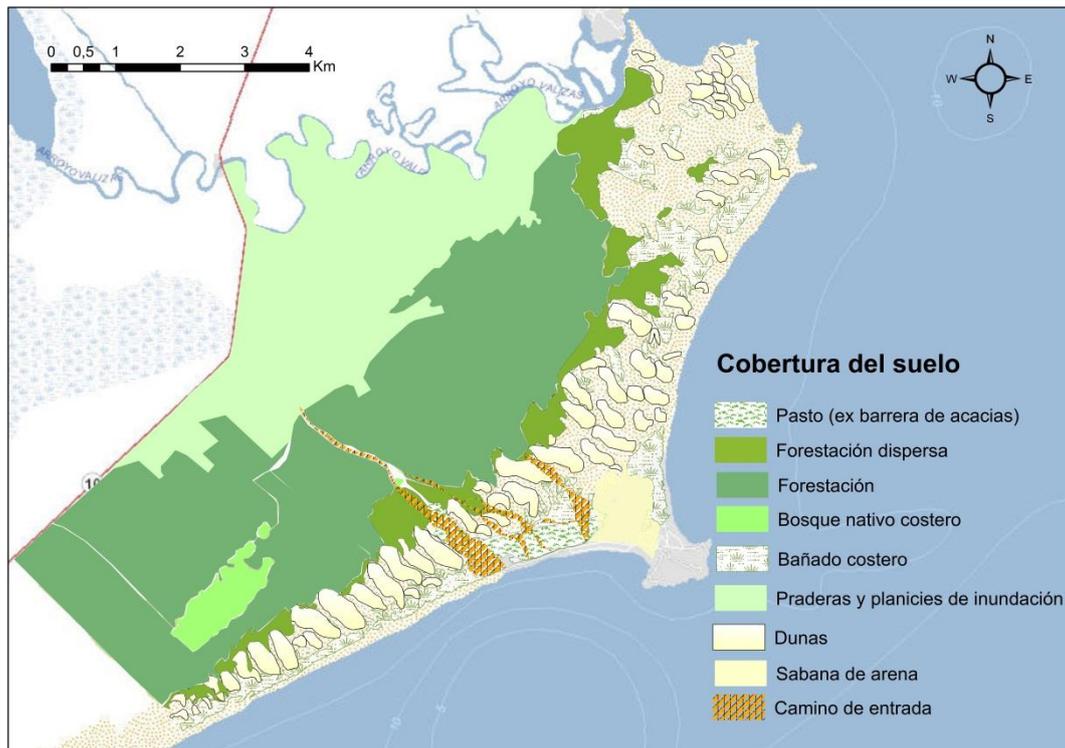


Figura 3. Cobertura del suelo en el Parque Nacional Cabo Polonio realizada a partir de la clasificación de una imagen satelital Bing de alta resolución espacial (complemento OpenLayersPlugin, de QGIS 3.4). Elaboración: Manuel Pisciettano

3.1.3. Sistemas de dunas

El sistema de dunas del Área Protegida Cabo Polonio fue ampliamente estudiado por De Álava et al. (1992), Panario y Piñeiro (1997), y Panario y Gutiérrez (2005).

De Álava et al. (1992) clasifican este sistema de dunas en dos grandes grupos, sistema Cabo Polonio y sistema Buena Vista, a su vez el primero se divide en dos grandes sub-sistemas, Brisas del Polonio y Perla de Rocha. El sub-sistema Brisas del polonio se inicia en la ruta N°10 pasando por detrás de la playa la ensenada y finalizando en el océano en la playa de la Calavera, se trata de un tren de dunas de arenas medias y gruesas, transversales que evolucionan a barjanes al aproximarse a la playa Calavera. El subsistema Perla de Rocha se

encuentra al suroeste del sistema y es el reservorio que alimenta al sistema de dunas. El sistema Buena Vista se encuentra al noreste del sistema Cabo Polonio derivando al arroyo Valizas y al océano atlántico, se trata de dunas barjanoides y sinusoidales que responden a vientos predominantes del noreste, pero que debido a su granulometría más fina se ve influenciado por viento de otras direcciones. Se destaca el Cerro de la Buena Vista, afloramiento granítico de mayor altura en el área (Figura 4).

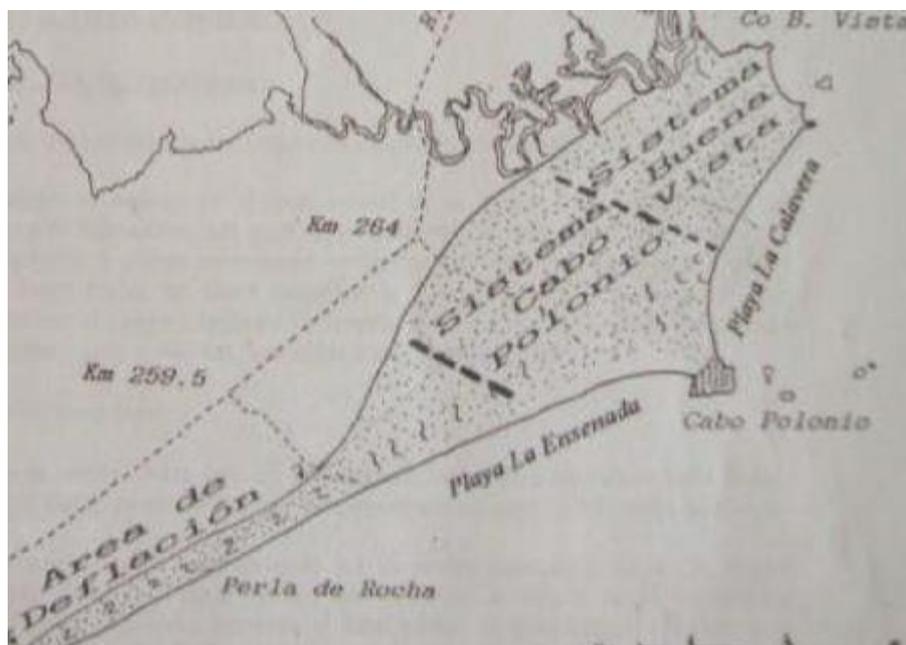


Figura 4. Sistemas de dunas del Parque Nacional Cabo Polonio. Tomado de Panario et al. (1993).

La velocidad y dirección del transporte de arena de este sistema de dunas fue estudiada en Panario y Piñeiro (1997) y los resultados muestran que el movimiento de estas dunas es influenciado por el efecto de los vientos fuertes de la zona del suroeste (SO), por lo tanto las dunas se desplazan hacia el noreste (NE). Estos sedimentos transportados a través de las dunas alcanzan directamente el Océano Atlántico (playa La Calavera) y la desembocadura del

arroyo Valizas, y luego son re-transportados por este arroyo hacia el océano, donde influenciados por las corrientes marinas retornan al sistema. A su vez existe un intercambio eólico en la zona del tómbolo entre las dos playas (Panario et al.,1993).

3.1.4. Altimetría

El área de Cabo Polonio, presenta un relieve particular, con elevaciones que varían entre 10 y 50 msnm (metros sobre el nivel del mar) de altitud. El punto más alto del área, está representado por el Cerro Buena Vista, con 50 msnm. Se distingue el cordón arenoso de Lomas de Narváez el cual corresponde a las zonas más altas promediando 30 msnm (Figura 5) (Panario et al., 1993).

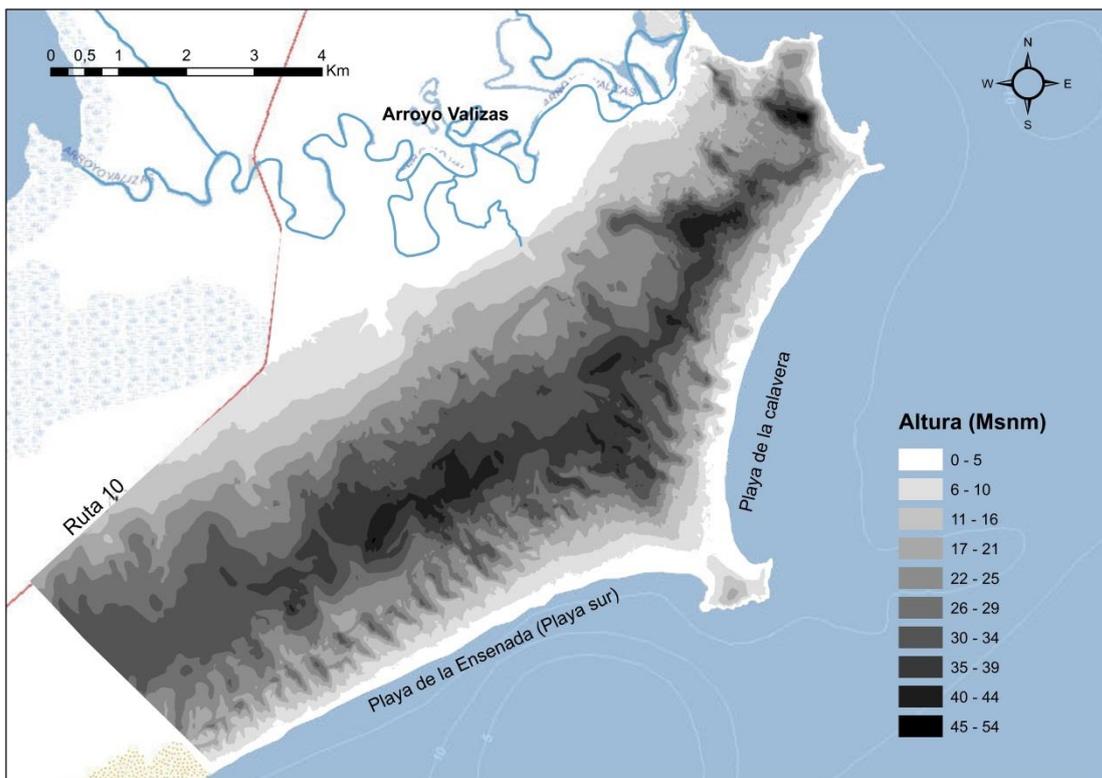


Figura 5. Altimetría en el área de estudio, extraído del Modelo Digital del Terreno del año 2018, obtenido a partir del vuelo realizado por la IDE (Infraestructura de Datos Espaciales) a nivel nacional. Elaboración: Manuel Pisciotano

3.2. Estrategia metodológica

La estrategia metodológica se dividió en dos etapas. En primer lugar se reconoció la evolución espacio – temporal del bosque forestal y se clasificaron las formas dunares para el período 2000 – 2015 de manera de tener un mayor conocimiento de los procesos ocurridos. En segundo lugar se identificaron zonas favorables para el establecimiento de la forestación a partir de un modelo predictivo y se identificaron áreas frágiles en los sistemas de dunas del área protegida a partir de las formas dunares identificadas y de su ubicación en el área de estudio. La integración de estos factores permitió identificar las áreas prioritarias para el control de la forestación en el Parque Nacional Cabo Polonio (Figura 6).

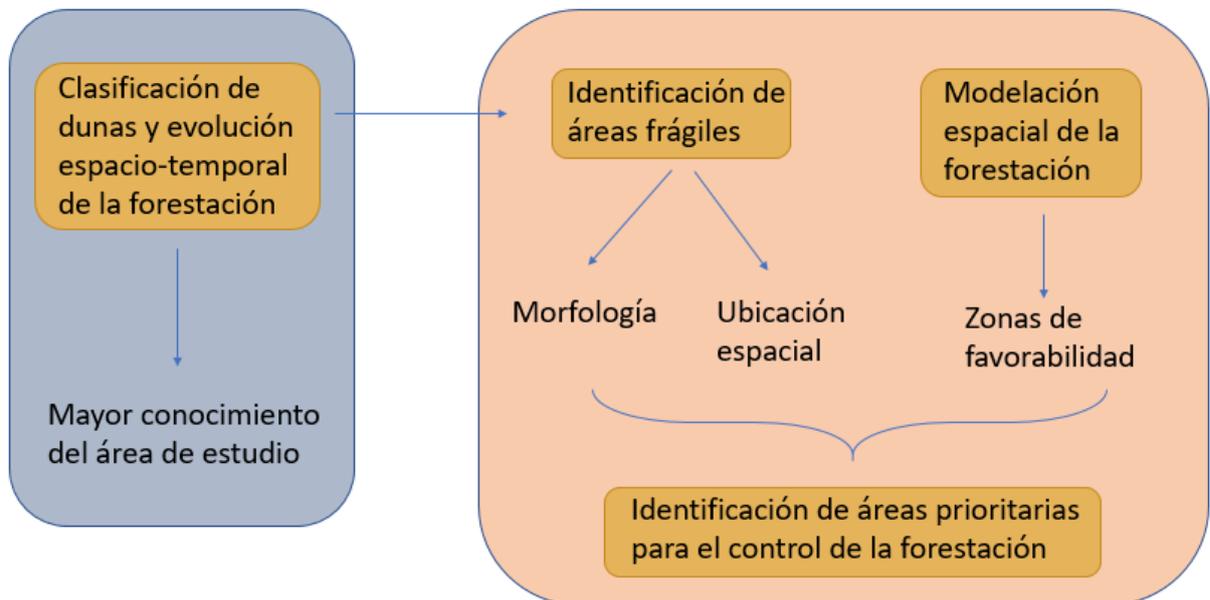


Figura 6. Estrategia metodológica

3.2.1. Digitalización de la cobertura del suelo

Se digitalizaron los distintas coberturas del suelo del área a partir de la imagen de alta resolución Bing del año 2015 (complemento OpenLayersPlugin, de QGIS 3.4), en donde se identificaron las siguientes coberturas: Forestación (bosque consolidado), Forestación dispersa (foco de dispersión), bañado costero, zonas empastadas (ex barrera de acacias), campo (praderas y planicies de inundación del arroyo Valizas), bosque nativo costero, centro poblado, caminos de entrada y zonas con arena libre.

3.2.2. Clasificación de la cobertura vegetal y de dunas

Para los periodos de análisis, 2000, 2006 y 2015, se identificaron las zonas con forestación consolidada, las zonas con vegetación dispersa de pinos y acacias, y las zonas empastadas (ex barrera de acacias). Se estimó el área ocupada por estas coberturas para las distintas fechas.

A partir de fotointerpretación se realizó una delimitación aproximada de las formas dunares para los años 2000, 2006 y 2015 y se identificaron los frentes de avance y erosión de las dunas, así como las zonas a barlovento (incidencia directa del viento) y sotavento en las dunas transversales del sistema Cabo Polonio.

Se realizó el mismo trabajo para el año 2018 con la ayuda del Modelo Digital del Terreno lo cual permitió definir las formas dunares y frentes con mayor precisión.

3.2.3. Identificación de zonas con mayor fragilidad en el sistema de dunas

Para establecer una jerarquización del grado de fragilidad en el sistema de dunas se consideraron criterios morfológicos de las dunas y criterios según su localización dentro del área protegida. En primer lugar se realizó una zonificación categorizando el área en tres categorías: No crítica, crítica y muy crítica.

El sistema dunar Cabo Polonio se incluyó en la categoría muy crítica ya que abarca la zona con mayor aporte de arena en el área y gran parte de la zona con dunas activas. Este sistema ocupa aproximadamente 1.100 Ha y está compuesta en su mayor parte por arena libre (dunas transversales) y vegetación de bañado costero.

El sistema Buena Vista y las zonas de arena libre en sus adyacencias se consideraron zona crítica para la conservación ya que cumple un papel relevante en la dinámica de las arenas, tanto para el área protegida como para zonas adyacentes y por su singularidad tiene un valor recreativo y cultural de relevancia (Panario et al., 1993; Cortazzo, 2012). Esta zona abarca aproximadamente 650 Ha.

Dicha zonificación responde al plan de manejo elaborado para el área (SNAP, 2019) (Figura 7). En este trabajo no se consideró como zona crítica la zona del bosque forestal consolidado debido a que presenta un alto grado de antropización, dando prioridad a las zonas mejor conservadas.

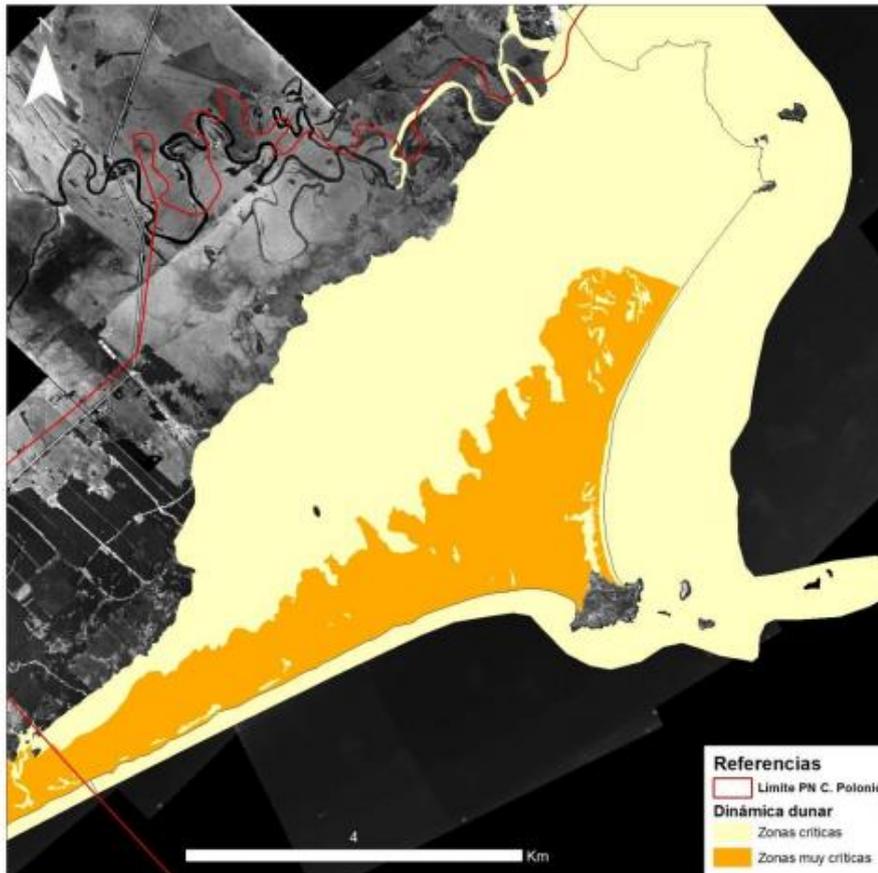


Figura 7. Delimitación de áreas críticas para la conservación elaboradas en el plan de manejo del área (SNAP, 2019).

En cuanto a los criterios morfológicos, se incluyeron las zonas a barlovento de cada duna transversal del sistema Cabo Polonio identificadas, debido a la importancia que tienen en la dinámica sedimentaria (SNAP, 2019).

3.2.4. Modelo de distribución de la forestación

Para elaborar el modelo de distribución de especies se generó una grilla vectorial en el programa QGis 3.4 compuesta por 4.954 celdas con una resolución espacial de 100x100 m en la cual se procesó la información, esta escala de análisis es generalmente utilizada en estudios de modelación a escala local (Guzmán, 2018; Miranda, 2013).

3.2.4.1. Presencia/ausencia de forestación en el área de estudio

Los datos de presencia de la forestación fueron obtenidos a partir de la clasificación de una imagen de alta resolución del satélite Bing-2015 (complemento OpenLayersPlugin, de QGIS 3.4). Teniendo en cuenta que la presencia de gran parte del bosque forestal se debe a que fue cultivado en el área, se identificaron por un lado las zonas con bosque consolidado, o ejemplares de pinos adultos que fueron cultivados en el área, y, por otro, las zonas con vegetación dispersa como indicador de la expansión del bosque. De esta manera, los modelos se alimentaron a partir de dos prevalencias diferentes: 1) Presencia de forestación: bosque consolidado más vegetación dispersa, 2) presencia de vegetación dispersa.

Del total de 4.954 celdas que conforman el área de estudio, en 1.562 cuadrículas se detectó la presencia de forestación consolidada, del género *Pinus* (*P. ellioti*, *P. taeda*, *P. radiata*, *P. pinaster*) y *Acacia longifolia*, mientras que en 676 cuadrículas se detectó presencia de forestación dispersa (Figura 8).

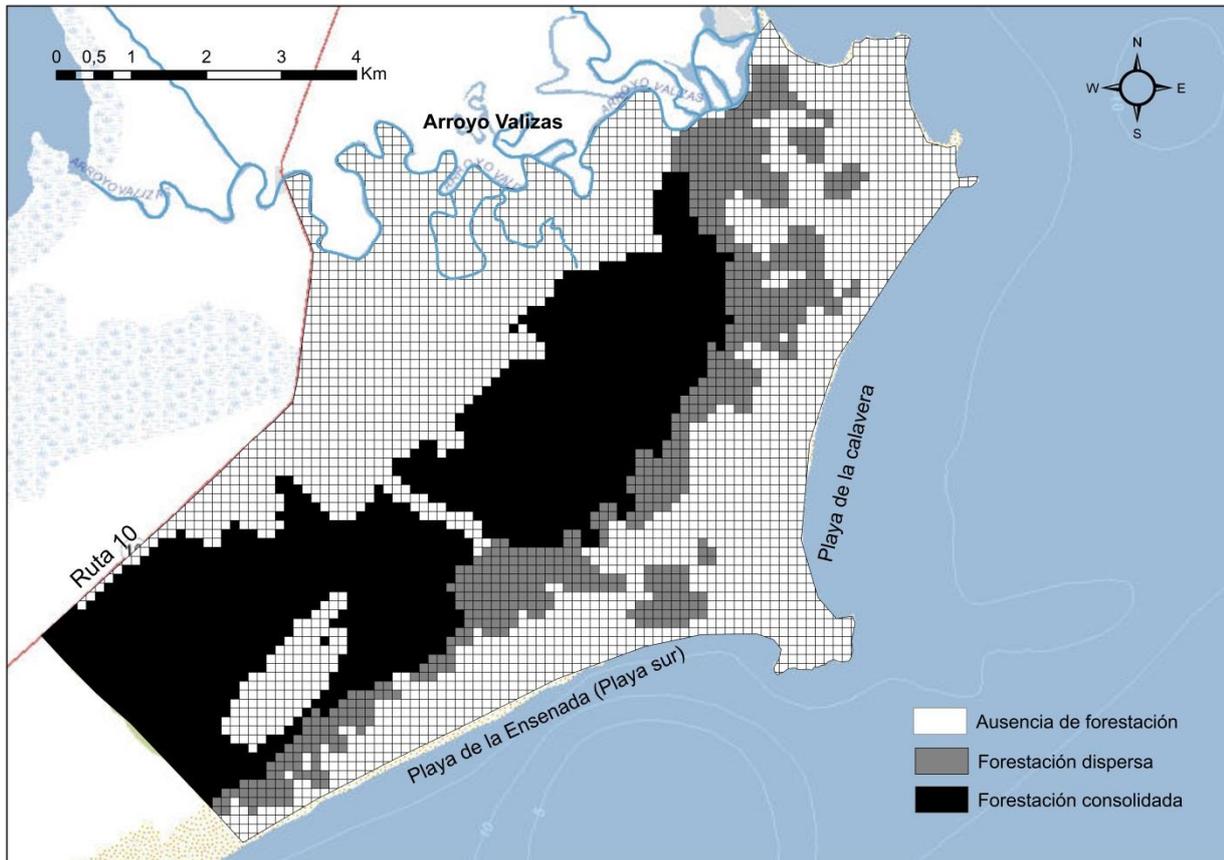


Figura 8. Distribución espacial de la forestación en el área de estudio, elaborado a partir de la clasificación de la imagen de alta resolución del satélite Bing-2015 (complemento OpenLayersPlugin, de QGIS 3.4).

3.2.4.2. Elaboración de variables predictoras

Se elaboraron 27 variables ambientales como posibles variables explicativas que se agruparon en tres factores: cobertura del suelo, topografía e influencia del viento (Tabla 1).

Tabla 1. Variables elaboradas para el proceso de modelación. En negrita variables no correlacionadas y utilizadas en el modelo forestación; en cursiva las variables del modelo dispersantes. *Variables elaboradas a partir de la clasificación de una imagen satelital Bing, año 2015 (OpenLayersPlugin, de QGIS 3.4). **Variables estimadas en el SIG. ***Información extraída del Modelo Digital del Terreno (MDT).

Factor	Variable	
	Abreviatura	Descripción
Cobertura del suelo*	<i>sup forest (ha)</i>	Superficie ocupada por forestación de pinos consolidada, en general se trata de ejemplares antiguos cultivados durante los procesos de forestación del área
	sup vd (ha)	Superficie ocupada por pinos y acacias que avanzan en el área por crecimiento propio y que pueden formar parches aislados.
	sup arena (ha)	Superficie cubierta por arena, dentro de esta se encuentran los campos de dunas móviles, las playas y la arena libre dentro del sistema.
	sup bañ (ha)	Superficies cubiertas por bañados costeros, depresiones interdunares inundables y las cañadas permanentes e intermitentes.
	sup camp (ha)	Superficie ocupada por las praderas, praderas arenosas y planicies inundables del arroyo Valizas.
	sup nati (ha)	Superficie ocupada por bosque nativo costero
	sup past (ha)	Incluye la superficie empastada formada a partir del retiro de la barrera de acacias plantada para hacer un camino de entrada al área.
	sup cp (ha)	Superficie ocupada por el centro poblado de Cabo Polonio
	sup camino (ha)	Superficie ocupada por caminos de ingreso de vehículos de pasajeros para turismo y vehículos privados hacia el área.
Distancia**	dist baña (m)	Distancia a bañado
	<i>dist fores (m)</i>	Distancia a forestación
	dist pasto (m)	Distancia a la superficie empastada
	dist cp (m)	Distancia a centro poblado
	dist arena (m)	Distancia a arena
	Dist campo(m)	Distancia a campo
	dist nativ (m)	Distancia a bosque nativo
	dist cami (m)	Distancia a camino
	dist vd (m)	Distancia a vegetación dispersa
dist costa (m)	Distancia a la costa	
Altura***	altura (msnm)	Altura
Influencia del viento*	zona 1	Sistema de dunas Cabo Polonio con mayor influencia de los vientos fuertes del SW (Barlovento) y de granulometría media o gruesa
	zona 2	Se refiere a la zona a sotavento dentro del sistema de dunas Cabo Polonio
	zona 3	Zona dentro del sistema Buena Vista al sur del límite de altura de Lomas de Narváez y de granulometría fina
	zona 4	Zona con gran influencia de vientos del NE debido a su granulometría fina
	zona 5	Zona del centro poblado y sábana de arena
	zona 6	Zona cubierta por forestación, praderas y planicies de inundación del A° Valizas

A partir de la clasificación de la imagen satelital Bing de alta resolución espacial (complemento OpenLayersPlugin, de QGIS 3.4) del año 2015, se digitalizaron las variables de cobertura de suelo. Se calcularon dos tipos de variables para cada cobertura: superficies y distancias. La superficie es el área ocupada por cada cobertura en cada celda del área de estudio, mientras la distancia determina la distancia mínima de cualquier punto del área de estudio a una celda con dicha cobertura. Se ingresaron ambos tipos de variables y se permitió al modelo elegir dado que proporciona una mayor precisión en los resultados, al proporcionar una mayor versatilidad al modelo en la explicación del patrón de ocupación de la especie de estudio (Romero, 2014).

Para evaluar la posible influencia de la altura en la presencia de la forestación, se utilizó el Modelo Digital del Terreno realizado (MDT) generado por la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) a nivel nacional. Para esto, se convirtió la información ráster a formato vectorial utilizando la herramienta Raster a Vectorial del software QGIS 3.4. La información obtenida se pasó a una capa de puntos, la cual pudo ser transferida a la grilla.

A partir de las medidas granulométricas y de movimiento de arena eólica obtenidas por Panario et al. (1993) se diferenciaron áreas con diferente susceptibilidad al transporte eólico. Para ello se realizó una zonificación basada en la topografía y la granulometría de la arena, dividiendo el territorio en seis zonas (Tabla 1) que debido a las geoformas existentes y a las coberturas del suelo muestran un comportamiento diferenciado con respecto a la influencia del viento (Figura 9). Dicha información sirvió como insumo al modelo para poder

tener una aproximación de la influencia del viento en el establecimiento de la forestación.

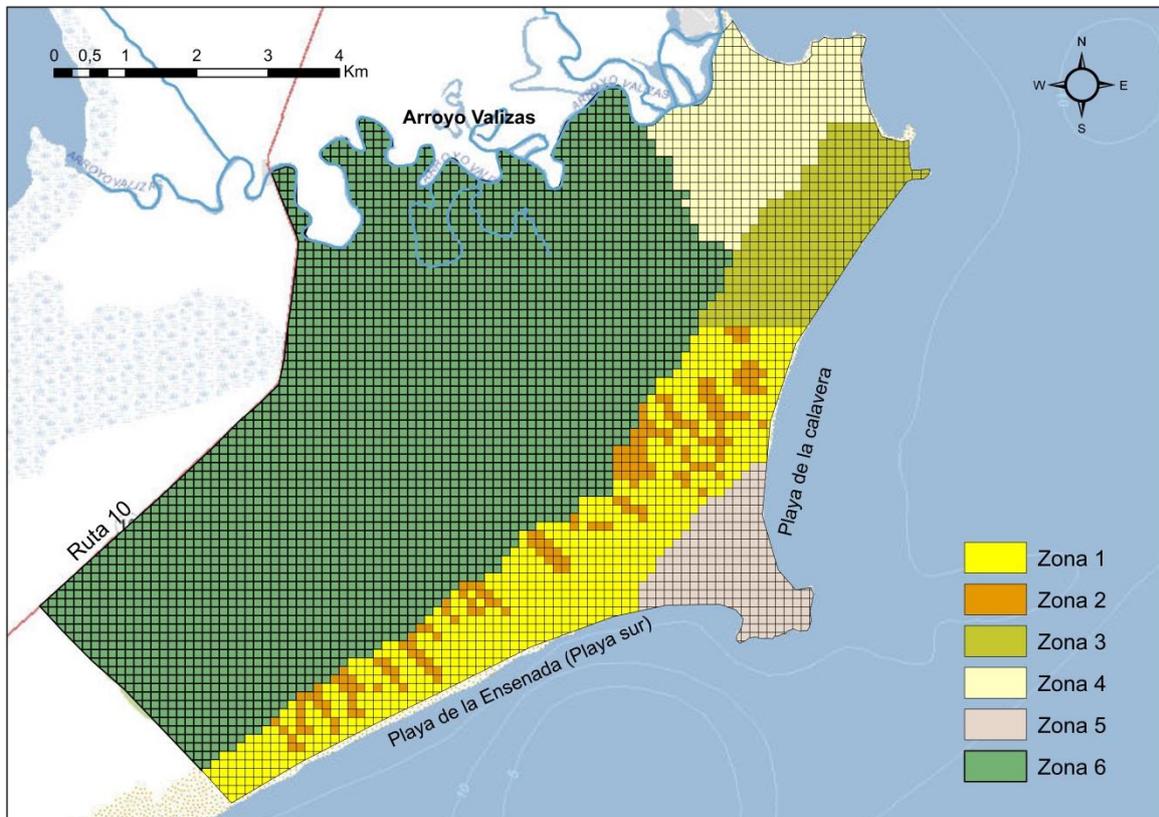


Figura 9. Distribución de las zonas con diferente susceptibilidad al transporte eólico, realizadas a partir de medidas obtenidas en (Panario et al.,1993). Zona 1: Sistema de dunas Cabo Polonio con mayor influencia de los vientos fuertes del SW (Barlovento) y de granulometría media o gruesa. Zona 2: Zona a sotavento dentro del sistema de dunas Cabo Polonio, más propensa a ser colonizada por la vegetación. Zona 3: Zona dentro del sistema Buena Vista al sur del límite de altura de Lomas de Narvárez y de granulometría fina. Zona 4: Zona con gran influencia de vientos del NE debido a su granulometría fina. Zona 5: Zona del centro poblado y sábana de arena. Zona 6: Zona cubierta por forestación, praderas y planicies de inundación del A° Valizas
Elaboración: Manuel Pisciotano.

3.2.4.3. Selección de variables

Con el fin de controlar la correlación entre las variables, y evitar la multicolinealidad en el modelo, se calculó el coeficiente de correlación de Spearman. De los pares correlacionados con más de 0.850, se seleccionaron siempre aquellas variables que facilitarán la interpretación ecológica del modelo (Romero, 2014). El peso relativo de las variables en cada modelo se estimó utilizando el parámetro de Wald (Wald, 1943). Dichos cálculos fueron realizados en el programa IBM SPSS Statistics 25.

3.2.4.4. Proceso de modelación

A partir de las variables predictoras seleccionadas (ver tabla 1) se modeló la presencia/ausencia de la forestación presente en el área (Modelo-forestación). Posteriormente, se construyó un segundo modelo teniendo en cuenta únicamente la presencia/ausencia de la forestación dispersa (Modelo-dispersantes), con la finalidad de analizar el comportamiento del foco de dispersión.

Para la elaboración de los modelos, se aplicó una regresión logística multifactorial binaria con la que se obtuvo el valor de probabilidad de presencia de la especie en cada uno de los dos modelos realizados (Romero, 2014). Para la elaboración de los modelos se utilizó el software IBM SPSS Statistics 25.

A partir de la probabilidad generada, se obtuvieron los valores de favorabilidad a partir de la función de favorabilidad (Real et al., 2006), mediante la fórmula:

$$F = [p/(1 - p)]/[(n_1/n_0) + (p/[1 - p])],$$

donde p es el valor de probabilidad obtenido para cada modelo y n_1 y n_0 son el número de presencias y ausencias respectivamente.

Los valores de favorabilidad predichos indican el grado en que la probabilidad de presencia de una especie difiere de la probabilidad de encontrarla por azar (Real et al., 2006). De esta manera, los modelos de favorabilidad proporcionan valores que pueden ser medidos independientemente de cuál sea la relación entre presencias y ausencias en un área de estudio (Romero, 2014).

Las celdas cuyo valor de favorabilidad fue 0,8 o superior se consideraron de favorabilidad alta, mientras que aquellos con valores iguales a 0,2 o inferiores se consideraron desfavorables. Las celdas restantes se consideraron de favorabilidad media (Muñoz et al., 2005).

3.2.4.5. Evaluación del modelo

Para evaluar la capacidad de clasificación de los modelos se emplearon la sensibilidad, la especificidad, los errores de omisión y de comisión, la tasa de clasificación correcta (TCC) y el índice Kappa de Cohen (Fielding y Bell, 1997).

Brito et al. (1999) plantean que la sensibilidad nos muestra la proporción de presencias correctamente predichas, la especificidad la de ausencias, mientras que los errores por omisión, la proporción de presencias no predichas y la comisión la de ausencias. Adicionalmente, estos índices varían entre 0 y 1, la sensibilidad y la especificidad cuanto más cerca de 1 indican una mejor

clasificación del modelo, a la inversa para los errores de omisión y comisión, que cuanto más cerca de 0 muestran un mejor desempeño del modelo. El valor de TCC es la proporción general, respecto a las presencias y a las ausencias, de localidades predichas correctamente. El índice Kappa de Cohen es una medida de la proporción de clasificaciones correctas no atribuibles al azar.

3.2.5. Identificación de áreas prioritarias para el control de la forestación

A partir de los resultados de favorabilidad obtenidos y de las zonas de mayor fragilidad en el sistema de dunas identificadas, se generó una clasificación cualitativa del territorio con distintos niveles de prioridad para la realización de actividades de control de la forestación (Tabla 2). Los valores de favorabilidad tomados para realizar este análisis fueron los del modelo forestación, por haber obtenido mejores valores en los índices de evaluación.

Posteriormente esta clasificación fue espacializada, resultando en un mapa con áreas prioritarias para el control de la forestación en el sistema dunar.

Tabla 2. Criterios utilizados para definir áreas prioritarias para control de la forestación.

Favorabilidad	Zona crítica	Zona a barlovento	Prioridad (Nivel)	Prioridad
Favorable	Muy crítica	Presencia	1	Muy alta
Favorable	Muy crítica	Ausencia	2	Alta
Favorable	Crítica	Presencia	2	Alta
Favorable	Crítica	Ausencia	3	Media – alta
Favorable	No crítica	Presencia	3	Media – alta
No favorable	Muy crítica	Presencia	3	Media – alta
Favorable	No crítica	Ausencia	4	Media
No favorable	Muy crítica	Ausencia	4	Media
No favorable	Crítica	Presencia	4	Media
No favorable	Crítica	Ausencia	4	Media
No favorable	No crítica	Presencia	5	No prioritaria
No favorable	No crítica	Ausencia	5	No prioritaria

4. RESULTADOS

4.1. Cambios en el sistema de dunas

El mayor cambio registrado se debe al avance del frente de forestación, siendo mayores estos cambios en la zona sur del área y al norte del sistema Cabo Polonio (Figura 10).

Por otra parte, se registró una disminución de la superficie cubierta por arena, la cual actualmente es ocupada por forestación, o vegetación de bañado asociado a depresiones inter-dunares o a cañadas permanentes o semi-

permanentes. Este proceso es visible en la zona cercana al camino de entrada y en las proximidades al cerro Buena Vista (Figuras 10 y 11).

Dentro del periodo se registró una tendencia al aumento en los frentes de erosión de las dunas y una parabolización de las formas dunares en toda el área de deflación así como en el sistema Cabo Polonio.

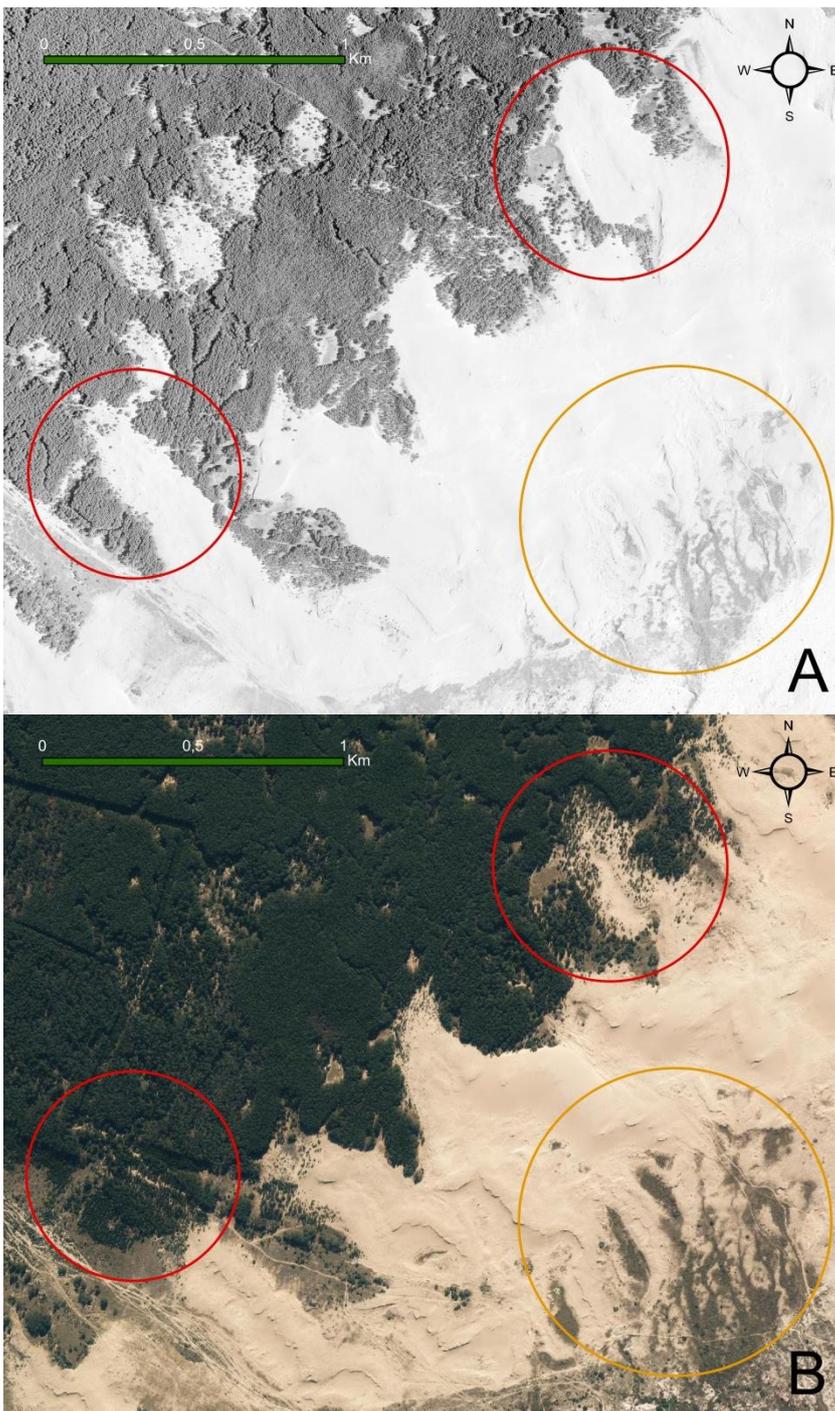


Figura 10. Cambios en el sistema de dunas al norte del camino de entrada. A) Imagen aérea tomada por la FAU (Fuerza Aerea Uruguaya) del año 2000. B) Imagen satelital Bing de alta resolución espacial (complemento OpenLayersPlugin, de QGIS 3,4) 2015. En los círculos rojos se puede ver el avance del frente de forestación sobre las dunas y en el círculo naranja la zona con pérdida de arena.



Figura 11. Cambios de la superficie cubierta por arena en el sistema Buena Vista. A) Imagen aérea tomada por la FAU (Fuerza Aérea Uruguaya) del año 2000 B) Imagen satelital Bing de alta resolución espacial (complemento OpenLayersPlugin, de QGIS 3,4) del año 2015.

4.2. Evolución espacial de la forestación

La evolución espacial de la vegetación de pino y acacias para el período estudiado tuvo un crecimiento continuo. Dicho crecimiento no fue homogéneo en toda el área, existiendo zonas con mayor crecimiento y zonas donde se detectó un menor avance del frente de forestación. También se registró un avance de las zonas con vegetación dispersa de pino y acacias dentro del período analizado (Figura 12).

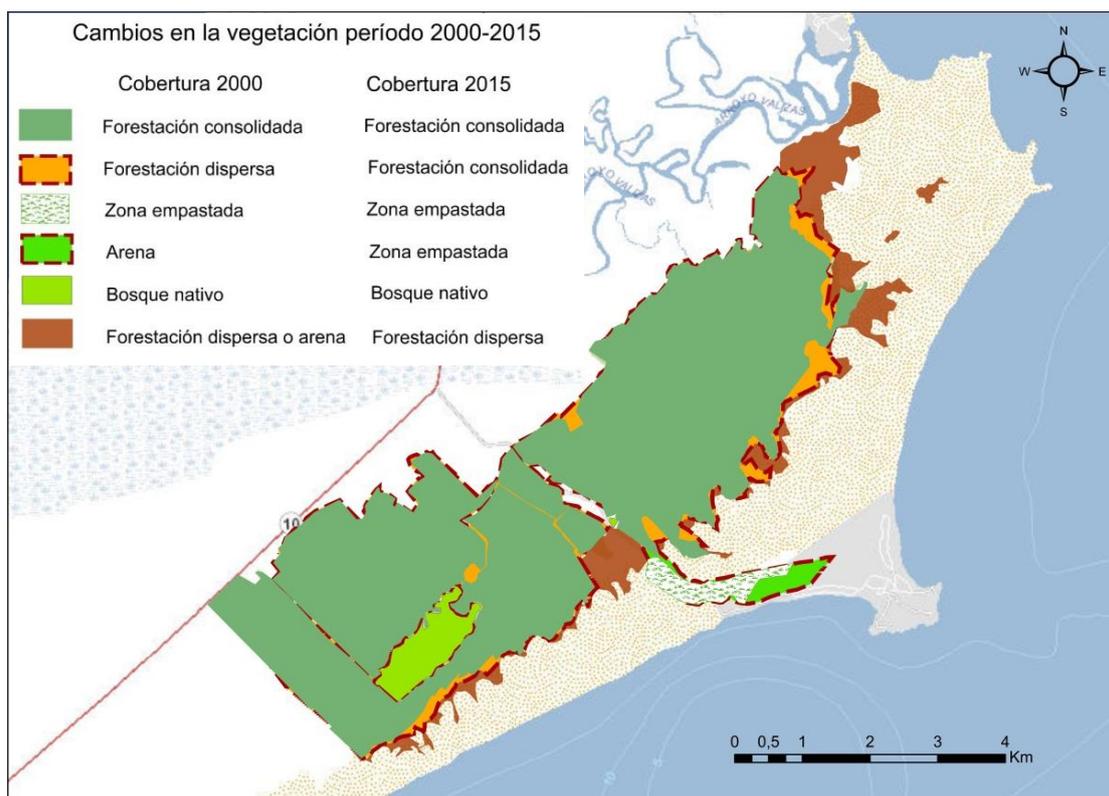


Figura 12. Cambios en la vegetación en el Parque Nacional Cabo Polonio en el Período 2000-2015. Realizado a partir de fotointerpretación de imágenes aéreas del año 2000 tomadas por la FAU (Fuerza Aérea Uruguaya) y de la clasificación de la Imagen satelital Bing de alta resolución espacial (complemento OpenLayersPlugin, de QGIS 3.4). Elaboración: Manuel Pisciotano

Se constató un avance del total de la forestación con una dirección definida, estableciéndose un gradiente desde el límite de forestación hacia la costa. Se identifican algunas zonas con un mayor avance de forestación dispersa, dentro del sistema Buena Vista en las proximidades del Arroyo Valizas, al norte del sistema de dunas Cabo Polonio y al SW del área en el inicio del sistema de dunas (Figura 12). Se identificó también un cambio en la superficie empastada (ex barrera de acacias) siendo esta mayor para el año 2015.

En cuanto a lo ocurrido al interior del período 2000-2015, los cambios fueron menores en el período 2000-2006 aunque se constató en la fotointerpretación

de las imágenes un crecimiento en la densidad de árboles dentro de las zonas consideradas vegetación dispersa. En cuanto al análisis del período 2006-2015 se registró un leve aumento en el área forestada (0,5%), el aumento del área de vegetación dispersa fue mayor (67,1%) (Tabla 3).

Tabla 3. Evolución espacial de la forestación (consolidada y dispersa) y porcentaje de cambio por cada período analizado.

Año	2000	2006	2015
Forestación (Ha)	1322	1324	1331
Porcentaje de cambio por período (%)		0,2	0,5
Forestación Dispersa (Ha)	160	173	289
Porcentaje de cambio por período (%)		8,1	67,1
Total (Ha)	1482	1497	1620
Porcentaje de cambio por período (%)		1	8,2

4.3. Modelo de favorabilidad

4.3.1. Evaluación del modelo

Ambos modelos tuvieron valores altos en los índices de evaluación que indican un alto rendimiento (Tabla 4). El modelo forestación presentó una mayor precisión en sus predicciones, ya que obtuvo una mejor clasificación según el índice Kappa de Cohen, así como en la especificidad, la tasa de clasificación correcta y errores por comisión.

Tabla 4. Valores de diferentes índices de evaluación para el modelo forestación (Total forestación) y el modelo dispersantes (solo vegetación dispersa). Los índices considerados fueron sensibilidad, especificidad y tasa de clasificación correcta (TCC); Índice Kappa de Cohen, errores por omisión y errores por comisión.

Índice	Modelo Forestación	Modelo Dispersantes
Kappa	0,80	0,46
Sensibilidad	0,93	0,93
Especificidad	0,86	0,74
TCC	0,90	0,77
Omisión	0,07	0,07
Comisión	0,14	0,26

4.3.2. Variables significativas en el modelo forestación

La tabla 5 nos muestra las variables que ingresaron en el modelo forestación. Las tres variables más significativas para el modelo forestación según el test de Wald fueron la superficie de arena, la altitud y la distancia al bañado. La superficie de arena resultó ser negativa para la presencia de la forestación, mientras que la altura demostró ser positiva. Por otra parte, cuando la distancia al bañado es menor, mayor es la explicación de la presencia de la forestación. Se destacan también en cuarto y quinto lugar la distancia al campo (praderas y planicies de inundación) y distancia al monte nativo, ambas negativas para la presencia de la forestación (Tabla 5).

Tabla 5. Variables explicativas ingresadas en el modelo-forestación y su peso relativo según el test de Wald. Los signos muestran la relación positiva o negativa entre la favorabilidad y las variables en los modelos. SUP ARENA (Superficie de arena), ALTURA MDT (Altimetría sobre el nivel del mar), DIST BAN (Distancia a bañado), DIST CAMPO (Distancia a campo), DIST NATIV (Distancia a bosque nativo), SUP CAMP (Superficie de campo), DIST CAMI (Distancia al camino), SUP NATI (Superficie de bosque nativo), SUP CAMIN (Superficie de camino), SUP PAST (Superficie de pasto).

Variable	Signo	Wald
SUP AREN	-	382,946
ALTURA MDT	+	261,715
DIST BAÑ	-	178,387
DIST CAMPO	-	142,570
DIST NATIV	-	112,057
SUP CAMP	-	60,794
DIST_CAMI	+	59,633
SUP NATI	-	40,664
SUP_CAMIN	-	30,892
SUP PAST	+	22,201
ZONA 3	-	21,366
ZONA 1	-	15,612

4.3.3. Zonas de favorabilidad en el modelo forestación

Se constatan tres grandes zonas con favorabilidad media y alta. Estas se ubican próximas a la masa forestal consolidada y presentan un gradiente hacia la costa. Una zona hacia el norte del área cercana al sistema de dunas buena vista y al norte del sistema Cabo Polonio, otra zona en el sur del área en el inicio del sistema de dunas Cabo Polonio y una última zona en los alrededores

del camino principal de ingreso al área (Figura 13). Aproximadamente 2.000 Ha resultaron de favorabilidad alta (40 % del área de estudio), mientras que 665 Ha fueron de favorabilidad media (13%).

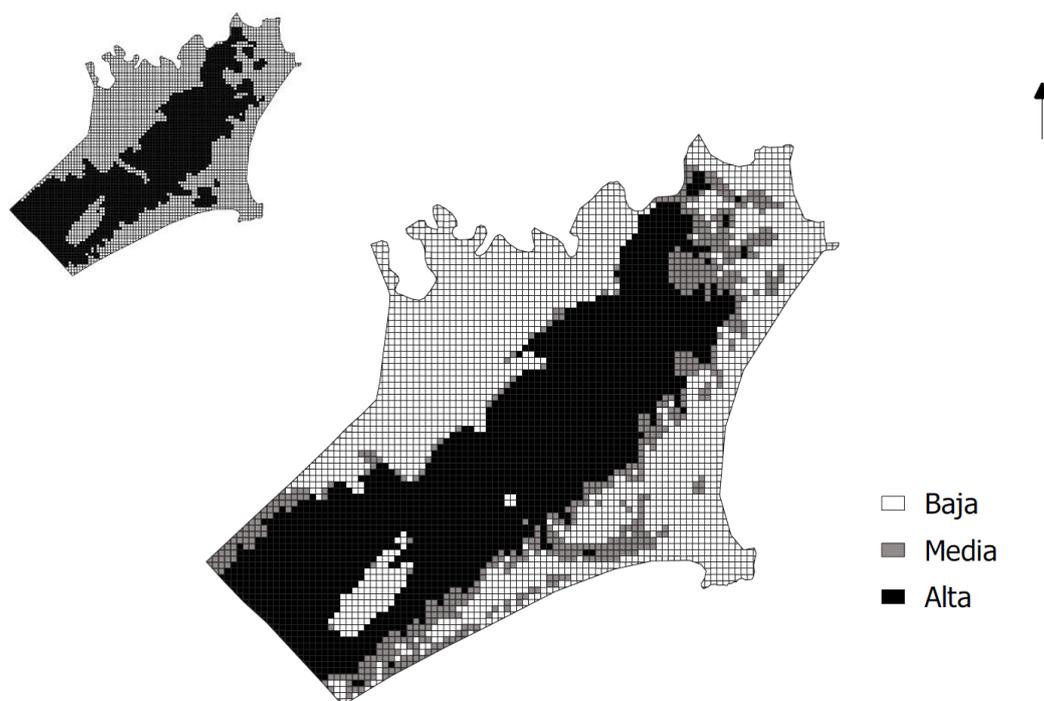


Figura 13. Arriba a la izquierda, en negro las presencias y en blanco las ausencias de la forestación consolidada más la forestación dispersa (modelo – forestación). Abajo a la derecha, zonas de favorabilidad obtenidas en el modelo Forestación. Favorabilidad baja ($F \leq 0,2$); favorabilidad media ($0,2 < F < 0,8$); favorabilidad alta ($F \geq 0,8$).

4.3.4. Variables significativas en el modelo dispersantes

Al analizar el foco de dispersión encontramos que las tres variables más significativas son distancia al bañado, altura y superficie de arena respectivamente. La altura presentó valores positivos, mientras que la distancia al bañado y la superficie de arena demostraron ser negativos en la explicación de la distribución de la forestación dispersa. La zona 4 y la zona 2 entraron

dentro de las cinco variables más significativas en el modelo dispersantes. Ambas demostraron ser positivas a la hora de explicar la distribución de la variable dependiente (Tabla 6).

Tabla 6. Variables explicativas ingresadas en el modelo-dispersantes y su peso relativo según el test de Wald. Los signos muestran la relación positiva o negativa entre la favorabilidad y las variables en los modelos. SUP ARENA (Superficie de arena), ALTURA MDT (Altimetría sobre el nivel del mar), DIST BAN (Distancia a bañado), DIST CAMPO (Distancia a campo), DIST CAMI (Distancia al camino), SUP NATI (Superficie de bosque nativo), SUP CAMIN (Superficie de camino), DIST CP (Distancia al centro poblado), SUP BAN (Superficie de bañado).

Variable	Signo	Wald
DIST BAÑ	-	307,282
SUP AREN	-	176,515
ALTURA MDT	+	148,131
ZONA 4	+	109,755
ZONA 2	+	93,018
DIST CAMPO	-	72,148
ZONA 3	+	57,340
ZONA 1	+	43,955
ZONA 5	+	36,871
DIST_CAMI	-	22,998
DIST CP	+	16,591
SUP_CAMINO	-	5,935
SUP BAÑ	-	5,091
SUP NATI	-	4,468
DIST NATIV	+	3,710

4.3.5. Zonas de favorabilidad en el modelo dispersantes

Al tomar como variable dependiente solamente a la vegetación dispersa los resultados del modelo nos muestra una zona de favorabilidad próxima a las zonas con presencias de Vegetación dispersa, avanzando hacia la costa. Se visualiza una gran zona con favorabilidad media en todo el sur del área, comienzo del sistema de dunas. También se registra una zona de favorabilidad media en el norte del área (sistema Buena Vista). Se destaca una zona con favorabilidad alta en el camino de ingreso al área (Figura 14). 611 Ha resultaron de favorabilidad alta (12 % del área), mientras que 1.447 ha fueron de favorabilidad media (29%).

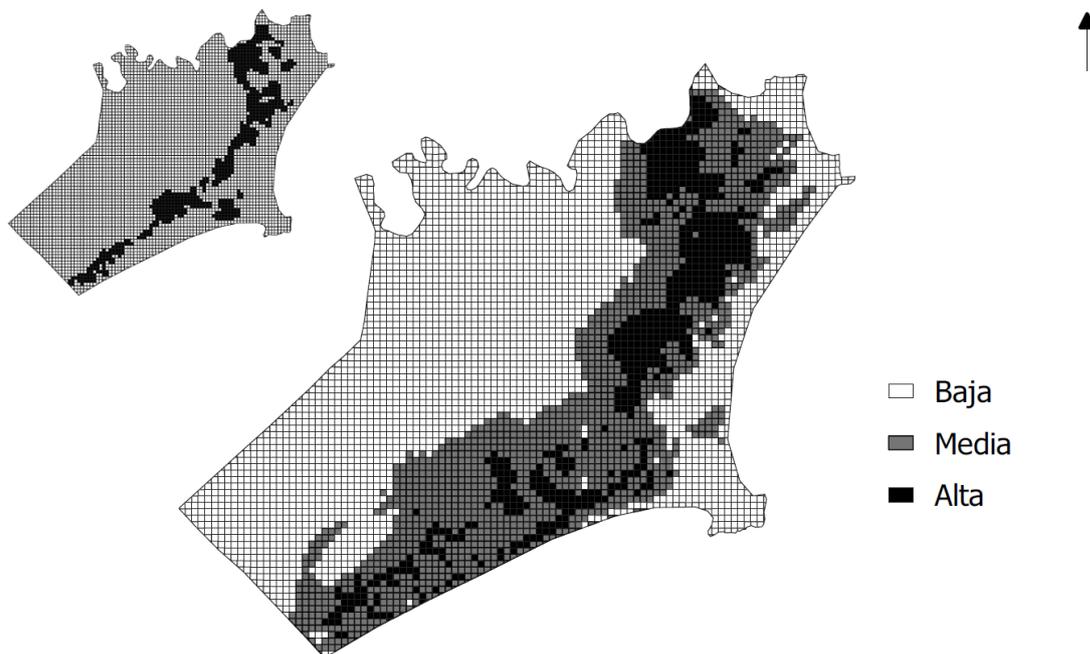


Figura 14. Arriba a la izquierda, en negro las presencias y en blanco las ausencias de la forestación dispersa (modelo – dispersantes). Abajo a la derecha, zonas de favorabilidad obtenidas en el modelo dispersantes. Favorabilidad baja ($F \leq 0,2$); favorabilidad media ($0,2 < F < 0,8$); favorabilidad alta ($F \geq 0,8$).

4.4. Áreas prioritarias para el control de la forestación

Se identificaron y espacializaron cinco zonas con diferentes niveles de prioridad (Figura 15):

- Muy alta: presenta una superficie de 175 Ha, lo cual representa el 3,5 % del área total. Corresponde a zonas dentro del sistema de dunas Cabo Polonio de especial valor ya que se encuentran a barlovento del viento dominante, presentan favorabilidad media o alta y están en la zona donde se registró avance de la forestación.

- Alta: Abarcando un total de 386 Ha (8% del área) esta zona comprende todo el frente de forestación en la zona del sistema Cabo Polonio así como la zona del camino de ingreso al área.

- Media – alta: Ocupa un 10% del área (508 Ha). Está comprendida por zonas de importancia para el transporte de arena en el sistema de dunas Cabo Polonio y la zona amenazada por la forestación en el sistema Buena Vista.

- Media: Es la zona que más superficie ocupa (2.484 Ha) lo que corresponde a un 50% del área. Más de la mitad de esta zona está comprendida por el bosque forestal consolidado plantado en décadas anteriores. En el resto se encuentran las zonas con arena libre que no fueron clasificadas en otra categoría.

- No prioritaria: Se consideraron no prioritarias las zonas del centro poblado, las zonas de praderas y planicies de inundación, bosque nativo y los arcos de playa cercanos al centro poblado. Esta zona ocupa 1.401 Ha, representando un 28% del área de estudio.

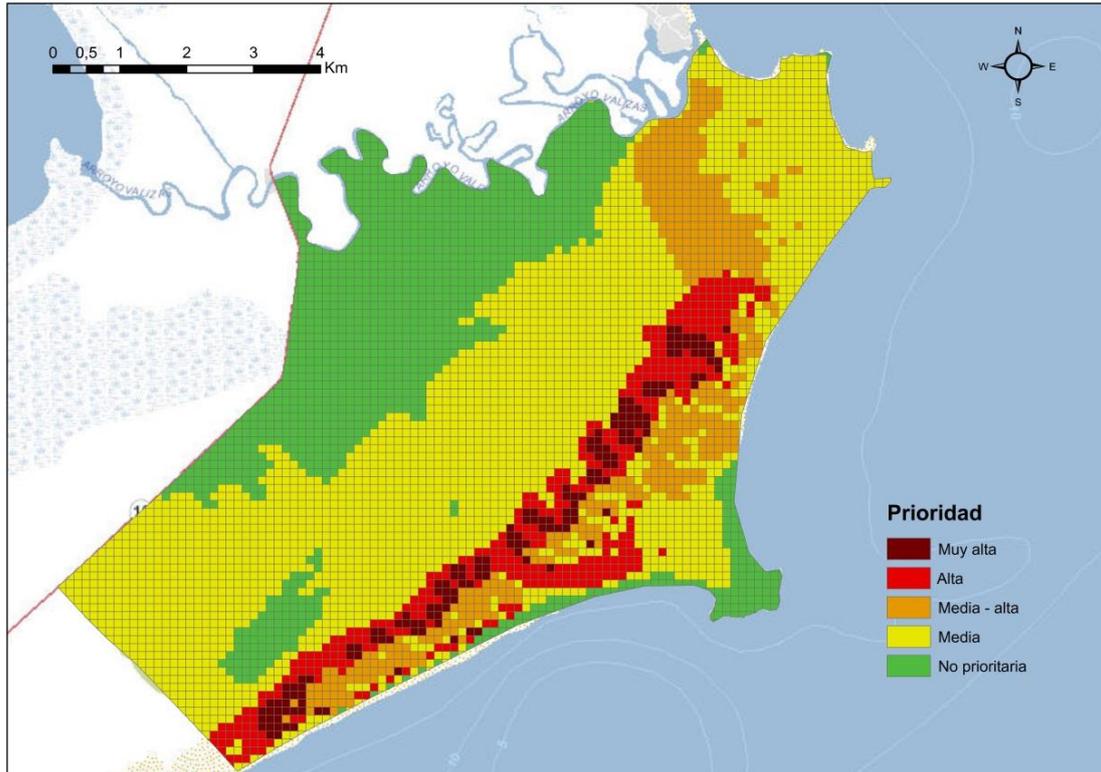


Figura 15. Áreas prioritarias para el control de la forestación. Elaboración: Manuel Pisciotano

5. DISCUSIÓN

5.1. Cambios en el sistema de dunas y evolución espacio-temporal de la forestación

Los cambios más importantes identificados fueron por sustitución de la superficie dunar debido al avance de la forestación. Dicho avance representa una amenaza para el sistema de dunas, dado que también contribuye al proceso de parabolización de dunas barjanoides, procesos estudiados y documentados por Panario y Gutiérrez (2005). Por otra parte, se constató mediante el análisis de las imágenes satelitales la pérdida de sedimentos en la zona del cerro de la Buena Vista, como consecuencia del déficit sedimentario

producido luego del proceso de forestación del área. Estos procesos fueron identificados por Panario et al. (1993) y Cortazzo (2012).

Se reconoce un aumento de frentes de erosión en comparación con la carta geomorfológica realizada en Panario et al. (1993), lo que evidencia un deterioro del sistema de dunas durante el período analizado. Sin embargo, estos cambios fueron de menor magnitud a los documentados en años anteriores por Panario y Piñeiro (1997) y Panario y Gutiérrez (2005). Este deterioro está en concordancia con la intervención humana en el área que generó grandes cambios en la dinámica del sistema de dunas durante la segunda mitad del siglo XX, fecha en la cual se dio la mayor intervención (Panario et al., 1993). Luego de extraída la barrera de acacias, los cambios ocurrieron más lentamente, dados principalmente por la invasión del frente de forestación y la gramilla (*Cynodon dactylon*) y por la pérdida de sedimentos en todo el campo dunar.

Si bien el crecimiento de la masa forestal es sostenido a lo largo del tiempo se pudo constatar que existen zonas donde hubo avance de la forestación con ejemplares juveniles y zonas con ejemplares adultos donde no existió avance del bosque, en concordancia con lo planteado por Cortazzo (2012).

Al analizar la evolución de la superficie forestal se aprecia que el crecimiento del bosque se da por dispersión del propio bosque y por la consolidación de la vegetación dispersa la cual al aumentar la densidad pasa a formar parte de la masa boscosa consolidada.

Este crecimiento sostenido y avance del frente de forestación sobre el campo de dunas marcaron una afectación sobre el sistema de dunas cada vez mayor,

incrementándose los procesos de degradación en el mismo a lo largo del período estudiado.

5.2. Modelación a través de la función de favorabilidad

Los índices de evaluación aplicados indicaron una correcta clasificación para los modelos realizados en este trabajo, por lo que se deduce una alta capacidad predictiva (Acevedo y Real, 2012).

Si bien existen trabajos con una resolución de pixel de 100 x 100 m (Guzmán, 2018; Miranda, 2013) la mayor parte de los estudios que han modelado la distribución de especies, son realizados a escalas de pixel mayores 10 x 10 km (Real et al., 2013), 50x50 km (Romero et al., 2019). Este estudio constituye uno de los primeros antecedentes de utilización de modelos de distribución de especies en un área menor a 5.000 ha, con fines de conservación de un determinado ambiente. Los rendimientos obtenidos en los modelos demuestran que la modelación a través de la función de favorabilidad constituye una herramienta útil a la hora de realizar estudios a escala local.

Según Dawson y Pearson (2003), a escala continental, el clima puede considerarse el factor dominante a la hora de explicar la distribución de especies, mientras que, a escalas locales, factores como la topografía, tipo de cobertura del suelo, tipo de suelo e interacciones bióticas se vuelven cada vez más importantes. Los modelos aplicados tuvieron una fuerte dependencia de las variables de cobertura del suelo como factores explicativos, en este sentido, información acerca del tipo de suelo y sobre interacciones bióticas podrían mejorar el resultado de la modelación (Tilman, 1994). La combinación de diferentes tipos de variables de cobertura del suelo (superficie /distancia)

permitió obtener buenos rendimientos en los modelos, confirmando lo realizado en Romero et al. (2013).

Ambos modelos coincidieron en que las variables superficie de arena, altura y distancia al bañado fueron las que tuvieron más peso a la hora de explicar la distribución de la forestación. Este resultado es apoyado por Tsoar y Blumberg (2002) que muestran que las zonas con arena libre (sistemas dunares) son zonas donde existe una mayor influencia del viento y por lo tanto son menos propicias para el establecimiento de la vegetación. Por otra parte, Sanjaume y Gomez (2009) demostraron que en los ambientes dunares e inter-dunares a medida que el nivel freático se aleja de la superficie y la frecuencia de encharcamiento es menor, estos son colonizados por especies de pinos que encuentran en estos lugares condiciones óptimas para su establecimiento. Por último, la evolución espacial de la forestación ha sido hacia la costa (zonas más bajas), lo que convierte a la altura en un factor importante a la hora de explicar la distribución de la forestación.

La zona con favorabilidad media a lo largo del camino de ingreso al área es explicada por la poca distancia a los bañados, así como por la presencia de la zona empastada (ex barrera de acacias) que tuvo una incidencia positiva para el establecimiento de la forestación, además esta zona presenta un alto grado de antropización lo que puede contribuir al establecimiento de especies invasoras (Ríos y Vargas, 2003).

La baja favorabilidad que presentó la zona cubierta por bosque nativo está en concordancia con lo expuesto por Ríos (2007) que concluye que a pesar de los impactos sobre la dinámica dunar de la forestación, el bosque nativo no ha

presentado mayores modificaciones luego de establecidas las plantaciones forestales.

En cuanto al análisis por zonas de susceptibilidad al transporte eólico, fue esperable el resultado negativo de las zonas 1 y 3 en el modelo forestación, ya que son las zonas con arena libre y que presentan un mayor transporte eólico dada la influencia de los vientos fuertes del S y SW. Por otra parte, en el modelo dispersantes, la zona 2 tuvo incidencia positiva y fue la quinta variable con más peso, explicando las celdas con favorabilidad media y alta en la zona de arena libre al sur del camino de entrada.

Se detectaron celdas con presencia de forestación en zonas con baja favorabilidad. Este resultado puede estar explicado porque son pixeles que en su mayor parte están cubiertos por arena, variable que incidió negativamente en la favorabilidad. Una resolución espacial mayor en la cuadrícula podría contribuir a mejorar estos resultados.

5.3. Áreas prioritarias para el manejo

Poder controlar el avance de la forestación sobre el sistema de dunas requiere de la remoción de casi la totalidad del bosque forestal presente en el área (SNAP, 2019; Panario et al., 1993; Cortazzo, 2012). Sin embargo, para facilitar el control de los procesos de degradación en el área se recomienda la definición de zonas críticas para el manejo (De Álava, 2007), por otra parte es recomendable realizar este proceso por etapas ya que en casos particulares de barreras que se encuentren en zonas de dunas, una extracción incompleta

puede provocar una aceleración del viento y favorecer la erosión (Panario et al., 1993). A su vez, Ríos (2007) plantea que la erradicación de la forestación debe ser de forma gradual para que la zona de bosque nativo costero más cercana al mar no sufra el estrés generado por los vientos incidentes a altas velocidades y cargadas de partículas del spray marino. La delimitación de áreas prioritarias para el control de la forestación constituye un aporte fundamental en este sentido.

Dentro de las zonas arboladas el transporte de arena tiende a cero e incluso fuera de las barreras la disminución en el transporte se percibe aproximadamente hasta un kilómetro fuera de la misma (Panario et al., 1993), por lo tanto, hay que tener especial cuidado que la forestación no se establezca en forma de barrera a los vientos dominantes. La compactación de la arena producida en la zona del camino de entrada (SNAP, 2019), más la alta favorabilidad que presenta la zona de la ex-barrera de acacias hacen que sea una zona donde el establecimiento de forestación puede nuevamente generar un efecto barrera de no tomar las medidas necesarias. Por otra parte, el control del empastamiento producido por la gramilla *Cynodon dactylon* se hace necesario en esta zona. Si bien existen antecedentes de control, en los últimos años la ocurrencia de veranos lluviosos ha favorecido el surgimiento nuevamente de esta vegetación (Caldevilla y Quintillán, 2002). La reincorporación del pastoreo con ganado vacuno sería una medida con efecto positivo en el control de esta gramilla (Panario et al., 1993).

Existe una zona de prioridad media ocupada por el bosque forestal consolidado, la cual a corto plazo no fue considerada prioritaria, pero es

fundamental tomar medidas de erradicación total o control de rebrotes a largo plazo. Si bien se han tomado medidas de extracción de la forestación, las mismas se enmarcaron mayoritariamente en control de rebrotes y de expansión del área forestada.

La reciente aprobación del plan de manejo para el área marca un compromiso por parte de las autoridades en poder llevar adelante medidas que lleven a una erradicación de la forestación. Dicho plan, planea la remoción de 800 Ha, medida indispensable para poder revertir los procesos negativos en el sistema de dunas. De todas maneras, para llevar a la práctica las actividades de control deberán hacerse estudios más detallados acerca de la dinámica dunar, así como la remoción de la gramilla y de la materia orgánica formada en toda el área, de manera de permitir el libre movimiento de arena y recuperar la conectividad en el sistema.

Las dunas longitudinales pertenecientes al sistema Buena Vista resultaron de prioridad media. Si bien presentan un alto valor ecológico y paisajístico, los modelos han demostrado que presentan favorabilidad baja, de todas maneras es imprescindible mantener esta zona libre de forestación. Por otra parte, debido a la ausencia de empastamiento por *Cynodon dactylon* y por tratarse de sedimentos más finos, las actividades de control sobre el frente de avance de forestación en el sistema Buena Vista pueden obtener mejores resultados que en el sistema Cabo Polonio en cuanto a la recuperación de la dinámica dunar.

Existen zonas donde se encuentran parches aislados con diferente prioridad. Estas responden a las zonas que estadísticamente resultaron favorables, de todas maneras para poder realizar la gestión se recomienda no tomar estas

zonas, de manera de poder focalizar los esfuerzos en aquellas áreas que ocupan mayores extensiones.

6. CONCLUSIONES

Se registró una menor cantidad de arena en ambos sistemas de dunas del área protegida, así como un aumento de frentes de erosión en las dunas, lo que marca un deterioro en el sistema durante el período 2000 - 2015. Por otra parte, dentro del período estudiado, la forestación marcó un avance continuo hacia el sistema dunas, lo que representa una amenaza para la integridad ecológica del área. Esto, sumado al creciente empastamiento con *Cynodon dactylon*, hace que la situación actual en el sistema de dunas sea cada vez más apremiante.

El modelo a través de la función de favorabilidad mostró alta potencialidad para predecir el escenario de cambio de la forestación a corto plazo dentro del área protegida, por lo que esta metodología puede ser una herramienta de manejo eficaz también a escala local.

Los mapas de favorabilidad obtenidos tanto para la forestación, como para la vegetación dispersa, muestran un gradiente de favorabilidad desde la zona forestada hacia la costa, siendo las variables que más explicaron su distribución la distancia a los bañados, la altura y las zonas cubiertas por arena libre.

La heterogeneidad espacial identificada permitió reconocer diferentes niveles de prioridad para el control de la forestación, destacándose las zonas a

barlovento en las dunas transversales del sistema Cabo Polonio que presentaron favorabilidad media o alta como las áreas con prioridad muy alta, por donde se recomienda comenzar el control de la forestación. A su vez, resultaron altamente prioritarias las zonas del camino de entrada y todo el frente de forestación en el sistema de dunas Cabo Polonio debido a su importancia en la conectividad del sistema.

7. PERSPECTIVAS A FUTURO

El avance de la forestación introducida en el área es sin dudas uno de los principales problemas (si no el principal) en el Parque Nacional Cabo Polonio, que ha llevado a un creciente deterioro en el sistema de dunas. De no tomarse medidas de erradicación de esta vegetación exótica, el área corre peligro de perder la singularidad que produjo su ingreso como área a proteger. La definición de áreas prioritarias pretende ser un aporte en este sentido, siendo un paso fundamental en la erradicación de la forestación.

Incrementar la escala de análisis redundará en beneficios para el diseño de actividades de control. En este sentido incrementar los relevamientos de campo permitiría obtener nuevos datos y variables para poder ingresar en el modelo y de esta manera obtener resultados con una mayor precisión. Información acerca de las características del suelo, de interacciones bióticas (presencia y dispersión de semillas) o datos de dirección e intensidad del viento, destacan como variables a incorporar en futuros estudios.

La clasificación de dunas realizada permitió identificar formas dunares activas y en buen estado de conservación, así como zonas donde existe un predominio de la erosión. El análisis de estos ambientes puede abrir diferentes líneas de investigación pensando en la conservación del sistema de dunas.

BIBLIOGRAFÍA

Acevedo, P., y Real, R. (2012). Favourability: concept, distinctive characteristics and potential usefulness. *Naturwissenschaften*, 99(7), 515-522.

Andrade, B., Arenas, F., y Lagos, M. (2010). Incorporación de criterios de fragilidad ambiental y riesgo en la planificación territorial de la costa de Chile central. *Revista de Geografía Norte Grande*, 5-20.

Brito, J.C; Crespo, L.G; y Paulo, O.S (1999). Modelling wildlife distributions: Logistic Multiple Regression vs Overlap Analysys, *Ecogeography*, 22:251-260.

Caldevilla, G. F., y Quintillán, A. M. (2002). Plan Para la Eliminación de una Forestación con Impactos Negativos en el Monumento Natural de Dunas y Costa Atlántica (Departamento de Rocha, Uruguay). *Acta de las XVII Jornadas Forestales de Entre Ríos: Concordia, Argentina*.

Cortazzo, R. (2012). *Impacto paisajístico ambiental en la zona de Cabo Polonio y Cerro de la Buena Vista: factores de presión antrópica* (Tesis de maestría). Udelar, Uruguay.

Cortés, M. M. C., y Calva, L. G. (2011). Zonificación territorial de la cuenca del Río Eslava, DF, a partir de la identificación de áreas ecológicamente sensibles. *sociedades rurales, producción y medio ambiente* vol 11, 17-52.

De Álava, D. (2007). *Incidencia del proceso de transformación antrópico en el sistema costero La Paloma-Cabo Polonio, Rocha, Uruguay* (Tesis de maestría). UdelaR, Uruguay.

De Álava, D., Fernández, G., Panario, D., y los Céspedes, C. (1992). Propuesta de Manejo para Área Protegida: Cabo Polonio–Monumento de Costa Oceánica–Cat. III UICN–Incluida en la Convención de Ramsar. *UNCIEP, Instituto de Geociencias, Facultad de Ciencias, Montevideo, 66.*

De Álava, D., y Panario, D. (1996). La Costa Atlántica: ecosistemas perdidos y el nacimiento de un monte de pinos y acacias. *Almanaque Banco de Seguros del Estado. Montevideo, 44-51.*

Fernandes, L. D. R., y Amaral, R. F. D. (2013). Paisagem costeira do litoral oriental do estado do Rio Grande do Norte (Brasil): Evolução temporal e padrões espaciais dos campos de dunas móveis. *Revista de Gestão Costeira Integrada, 13(1), 45-49.*

Fielding, A. H., y Bell, J. F. (1997). A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental conservation, 24(1), 38-49.*

García, D., y Vallejo, I. (2012). Caracterización y modelos de funcionamiento del sistema playa-duna en el Parque Nacional de Doñana (Huelva, España). In *XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. Madrid: AGE-CSIC.*

Guisan, A., y Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological modelling, 135(2-3), 147-186.*

Guzmán, M. (2018). *Modelos de Distribución Potencial de Especies Forestales en las Sierras de Jaén. Aplicaciones de alta resolución* (Tesis de maestría), Universidad de Jaén, España.

Hernández Calvento, L. (2002). *Análisis de la evolución del sistema de dunas de Maspalomas, Gran Canaria, Islas Canarias (1960-2000)* (Doctoral dissertation).

Hernández-Cordero, A. I., Pérez-Chacón, E., y Hernández-Calvento, L. (2008). Aplicación de tecnologías de la información geográfica al estudio de la vegetación en sistemas de dunas litorales. Resultados preliminares en el campo de dunas de Maspalomas (Gran Canaria, Islas Canarias). *Tecnologías de la Información Geográfica para el Desarrollo Territorial; Servicio de Publicaciones y Difusión Científica de la ULPGC: Las Palmas de Gran Canaria, Spain.*

IMR, Intendencia Municipal de Rocha (2018). Datos Ingreso de visitantes Parque Nacional Cabo Polonio, Informe Dirección de turismo <http://turismorocha.gub.uy/ogd/Informe-enero-2018-Rocha.pdf>

Ley, C., Gallego-Fernández, J. B., y Vidal, C. (2007). *Manual de restauración de dunas costeras*, Cantabria, España, Ministerio de medio ambiente. Dirección General de Costas.

Maderni, J. F. P. (2007). *Crónicas del desarrollo forestal del Uruguay*. Editorial Fin de Siglo.

Mateo, R. G., Felicísimo, Á. M., y Muñoz, J. (2011). Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista chilena de historia natural*, 84(2), 217-

240.

Mateo, R. G., Felicísimo, Á. M., y Muñoz, J. (2012). Modelos de distribución de especies y su potencialidad como recurso educativo interdisciplinar. *Reduca (Biología)*, 5(1), 137- 153.

Miranda, A. (2013). Identificación de sitios favorables para la regeneración de la palma chilena (*Jubaea chilensis* (Mol.) Baillón) a través de modelación espacial.

Muñoz, A. R., Real, R., Barbosa, A. M., y Vargas, J. M. (2005). Modelling the distribution of Bonelli's eagle in Spain: implications for conservation planning. *Diversity and Distributions*, 11(6), 477-486.

MVOTMA, Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (2009). *Proyecto de ingreso del área protegida marino-costera de Cabo Polonio al Sistema Nacional de Áreas Protegidas*, Mayo 2009.

Nordstrom, K. F. (2004). *Beaches and dunes of developed coasts*. New Jersey, USA. Cambridge University Press.

Panario, D., Piñeiro, G., De Álava, D., Fernández, G., Gutiérrez, O., y Céspedes, C. (1993). Dinámica sedimentaria y geomorfológica de dunas y playas en Cabo Polonio, Rocha. *Montevideo, Udelar, Facultad de Ciencias-UNCIEP, Documento Técnico*.

Panario, D., y Piñeiro, G. (1997). Vulnerability of oceanic dune systems under wind pattern change scenarios in Uruguay. *Climate Research*, 9(1-2), 67-72.

Panario, D., y Gutiérrez, O. (2005). La vegetación en la evolución de playas

arenosas. El caso de la costa uruguaya. *Revista Ecosistemas*, 14(2), 1-12.

Price, A., y Humphrey, S. (1993). *Application of the Biosphere Reserve concept to coastal marine areas*, Gland, Suiza, UICN.

Real, R., Barbosa, A. M., y Vargas, J. M. (2006). Obtaining environmental favourability functions from logistic regression. *Environmental and Ecological Statistics*, 13(2), 237-245.

Real, R., Romero, D., Olivero, J., Estrada, A., y Márquez, A. L. (2013). Estimating how inflated or obscured effects of climate affect forecasted species distribution. *PLoS One*, 8(1), e53646.

Richiano, S., Varela, A. N., Leandro, D. E., Bilmes, A., y Aguirre, M. (2012). Evolución paleoambiental de cordones litorales holocenos durante una caída del nivel del mar en la Bahía Samborombón, Buenos Aires, Argentina. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 19(2), 105-124.

Ríos, H., y Vargas, O. (2003). Ecología de las especies invasoras. *Pérez Arbelaezia*, 14, 119-148.

Rios, M. (2007). *Incidencia de la forestación con especies exóticas sobre el bosque costero en la localidad Perla de Rocha, (Rocha) Uruguay* (No. 630 RIO).

Romero, D., Olivero, J., y Real, R. (2013). Comparative assessment of different methods for using land-cover variables for distribution modelling of *Salamandra salamandra longirotris*. *Environmental conservation*, 40(1), 48-59.

Romero, D. (2014). Efectos previsibles del cambio climático en la distribución de los vertebrados amenazados de España peninsular (Tesis Doctoral).

Universidad de Málaga, España.

Romero, D., Olivero, J., Real, R., y Guerrero, J. C. (2019). Applying fuzzy logic to assess the biogeographical risk of dengue in South America. *Parasites y vectors*, 12(1), 428.

Ruberti, D., Vigliotti, M., Di Mauro, A., Chieffi, R., y Di Natale, M. (2018). Human influence over 150 years of coastal evolution in the Volturno delta system (southern Italy). *Journal of coastal conservation*, 22(5), 897-917.

Ruiz García, S. (2016). Desarrollo de modelos geomorfológicos de alta resolución espacial mediante técnicas de teledetección “El Macizo de Ándara”.

Sanjaume, E. y Gómez-Serrano, M. Á. *Dunas con bosques De Pinus Pinea y/o Pinus Pinaster. Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España*. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. Madrid, 48 p.

SNAP, Sistema Nacional de Áreas Protegidas (2019). *Plan de Manejo Parque Nacional Cabo Polonio*. Febrero, 2019

Tamanini, M. D. S. A. (2008). Diagnóstico físico-ambiental e a determinação da fragilidade potencial e emergente da bacia do baixo curso do rio Passaúna em Araucária-Paraná.

Tilman, D. (1994). Competition and biodiversity in spatially structured habitats. *Ecology*, 75(1), 2-16.

Trujillo Vera, C. C. (2018). Contribución de las dunas costeras en los servicios ecosistémicos en el litoral de Tanaca, Distrito de Yauca, Provincia de Caravelí,

Región Arequipa 2017.

Tsoar, H., y Blumberg, D. G. (2002). Formation of parabolic dunes from barchan and transverse dunes along Israel's Mediterranean coast. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27(11), 1147-1161.

Wald, A. (1943). Tests of statistical hypotheses concerning several parameters when the number of observations is large. *Transactions of the American Mathematical society*, 54(3), 426-482.

Web: <https://github.com/sourcepole/qgis-openlayers-plugin>