

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**IDENTIFICACIÓN DE SITIOS FAVORABLES PARA LA
REGENERACIÓN DE LA PALMA CHILENA (*JUBAEA
CHILENSIS* (MOL.) BAILLÓN) A TRAVÉS DE MODELACIÓN
ESPACIAL.**

ALEJANDRO MIRANDA CERPA

Santiago, Chile
2013

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**IDENTIFICACIÓN DE SITIOS FAVORABLES PARA LA
REGENERACIÓN DE LA PALMA CHILENA (*JUBAEA
CHILENSIS* (MOL.) BAILLON) A TRAVÉS DE MODELACIÓN
ESPACIAL.**

**IDENTIFICATION FOR FAVORABLE REGENERATION SITES
OF THE CHILEAN PALM (*JUBAEA CHILENSIS* (Mol.) BAILLON)
THROUGH SPATIAL MODELING.**

ALEJANDRO MIRANDA CERPA

Santiago, Chile
2013

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

**IDENTIFICACIÓN DE SITIOS FAVORABLES PARA LA
REGENERACIÓN DE LA PALMA CHILENA (*JUBAEA
CHILENSIS* (MOL.) BAILLON) A TRAVÉS DE MODELACIÓN
ESPACIAL.**

Memoria para optar al título profesional de:

Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

ALEJANDRO MIRANDA CERPA

Profesor Guía:	Calificaciones
Jaime Hernández P. Ingeniero Forestal, Dr.	6,8
Profesores Evaluadores:	
Mauricio Galleguillos T. Ingeniero Agrónomo, M.S. Dr.	7,0
Victor García de Cortázar G. de C. Ingeniero Agrónomo, Dr. Ing.	6,7

Santiago, Chile
2013

AGRADECIMIENTOS

De una u otra forma, muchas personas han colaborado para que este trabajo haya sido posible. Sin embargo hay quienes han jugado un rol fundamental.

A quienes participaron de mi formación básica, Flor, Augusto y Eugenio, quienes no participaron únicamente en mi formación profesional, sino personal y valórica. En especial a mi madre, que si bien muchas veces perdió las esperanzas, gracias a su entera generosidad, supo acompañarme a diferentes distancias. Gracias por todo. A Augusto por su enorme paciencia y sabiduría en momentos poco felices, además de siempre creer en mí. A mi viejo, gracias por acompañarme en este proceso, gracias por tu apoyo siempre.

A Jaime Hernández, artífice de este trabajo, sin el cual no hubiera sido posible. Gracias por la paciencia y la buena voluntad de aceptar una y otra vez los múltiples encantos y desencantos con respecto a mi trabajo de título. A Eduardo Díaz, por su dedicado trabajo de campo para la obtención de los datos utilizados.

Quiero agradecer también a quienes jugaron un rol en la etapa final de este proceso, a Adison Altamirano por incentivarne continuamente a finalizar mi proceso de formación, a Raúl Orrego por ayudarme a desenredar y concluir mi trabajo. A Paulina González, por su voluntaria colaboración y preocupación. A Danielita, por su abnegado amor a los trámites y tareas poco atractivas del proceso de titulación. Danielita, verdad gracias, sin tu ayuda se me hubiera hecho todo muy difícil.

Muy especialmente, y por su llegada fundamental, quiero agradecer a mi compañera, sin quien probablemente esta tarea seguiría inconclusa. Gracias Angelita por apoyarme en cada nuevo proyecto.

Finalmente, agradecer a mi hermano Eugenio, que si “él está bien, todo está bien”.

ÍNDICE

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
INTRODUCCIÓN	5
Patrones y procesos puntuales	8
Objetivo General.....	9
Objetivos Específico.....	9
MATERIALES Y MÉTODOS.....	10
Área de estudio	10
Datos.....	12
Localización geográfica individuos.....	12
Métodos	13
Caracterización de la interacción espacial de individuos en diferentes estados de desarrollo de <i>Jubaea chilensis</i>	13
Interpretación análisis univariado y bivariado.....	13
Variables ambientales.....	14
Modelación de la densidad de individuos de regeneración y condiciones ambientales relacionadas	16
Selección del modelo.....	16
Identificación de sitios al interior de la ex Hacienda Siete Hermanas que presenten condiciones favorables para la regeneración natural de <i>Jubaea chilensis</i>	17
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
Caracterización de la interacción espacial de individuos en diferentes estados de desarrollo de <i>Jubaea chilensis</i>	18
Modelación de la densidad de individuos de regeneración y condiciones ambientales relacionadas	20
Identificación de sitios al interior de la ex Hacienda Siete Hermanas que presenten condiciones favorables para la regeneración natural de <i>Jubaea chilensis</i>	23
Discusión	25
Interacción espacial de individuos de regeneración y adultos de <i>Jubaea chilensis</i>	25
Condiciones ambientales relacionadas con la regeneración natural de <i>Jubaea chilensis</i>	27
Modelación de la densidad de regeneración.....	28
Identificación de sitios favorables para la regeneración de <i>Jubaea chilensis</i> en la ex Hacienda Siete Hermanas.....	28
CONCLUSIONES.....	29
BIBLIOGRAFÍA.....	30
APÉNDICES	37
Apéndice 1: Análisis univariante y bivariante de procesos puntuales.....	37
Análisis univariado	37
Análisis bivariado	37
Apéndice 2: Método de cálculo de un modelo digital de elevación mediante la utilización de estereopares de fotografías aéreas.....	39
Apéndice 3: Procesos de Poisson	41
Proceso homogéneo de Poisson.....	41
Proceso Inhomogéneo de Poisson	41
Proceso agrupado de Poisson	42

RESUMEN

Jubaea chilensis es un árbol endémico de la zona central de Chile. Es una especie amenazada, la cual ha visto reducida su población original en gran parte por su explotación para la producción de miel de palma. Sin embargo, actualmente la principal amenaza para la conservación de la especie está más relacionada con diferentes factores que limitan su regeneración natural. Estas amenazas han llevado a tener poblaciones coetáneas fuera de las áreas protegidas. Ejemplo de esto, en la ex Hacienda Siete Hermanas en la región de Valparaíso, se puede observar que el 90% de la población está compuesta por individuos adultos. En este trabajo cuantificamos la regeneración natural, para la identificación de condiciones favorables para el establecimiento de la especie y cuantificar la interacción espacial de individuos en diferentes estados de desarrollo. Mediante un análisis de procesos puntuales, se analizó la interacción espacial entre individuos provenientes de regeneración natural, y de ellos en relación a las posibles plantas madres, determinando la distancia, el tipo y rangos de interacción. Se construyó además un modelo estadístico para predecir la densidad de regeneración natural, asociándola a diferentes variables ambientales. Finalmente se utilizó el modelo ajustado para identificar sitios favorables para la regeneración natural de *J. chilensis* en la ex Hacienda Siete Hermanas. Los diferentes patrones espaciales analizados difirieron significativamente de un patrón de distribución aleatorio, observando una notoria agrupación espacial entre los individuos de regeneración para todos los rangos de distancia analizados, y de estos respecto a los adultos. Mediante la modelación espacial se determinó además que la regeneración natural de *J. chilensis* se relaciona significativamente con sitios con mayor cobertura vegetal, reflejado en la relación significativa positiva con el NDVI, y especialmente en sitios con una mayor radiación solar, expresado en la relación positiva entre densidad y exposición topográfica. Los resultados sugieren que la generación de núcleos de regeneración de *J. chilensis* se debería a la conjugación de condiciones ambientales propicias para el establecimiento de nuevos individuos. El patrón espacial de reclutamiento en *J. chilensis* sigue más bien el mecanismo planteado por Janzen–Connell, donde el mayor reclutamiento ocurre a distancias intermedias desde la planta madre, lo que puede sugerir una concentración de individuos en zonas donde las plántulas logren escapar a la depredación de semillas y a la herbivoría. Por otro lado, la relación significativa de la regeneración con el NDVI, sugiere la ocurrencia de un efecto nodriza, facilitador de la regeneración natural de la especie. Este efecto facilitador de la cobertura en la supervivencia de *J. chilensis* se debería principalmente a mejores condiciones ambientales bajo el dosel, por lo que la dispersión efectiva ocurriría limitado por su coincidencia con el nicho de regeneración bajo la cobertura vegetal. Este trabajo confirma la facilitación de *J. chilensis* por la vegetación acompañante en su ciclo reproductivo. Por lo cual, la restauración de la especie debe necesariamente considerar el reestablecimiento de elementos del bosque esclerófilo.

Palabras clave: Modelos espacialmente explícitos, efecto nodriza, clima mediterráneo, herbivoría.

ABSTRACT

Jubaea chilensis is an endemic tree of central Chile. It is an endangered species which has reduced its original population largely by exploitation for the production of palm honey. However, currently the main threat to the conservation of the species is related to different factors that are limiting natural regeneration. These threats have produced coetaneous populations out of the range of natural protected areas. An example of this occurs in the ex Hacienda Siete Hermanas, where we can observe that 90% of individuals are adults. In this study we quantified the natural regeneration of *Jubaea chilensis* and identified the best conditions for the natural regeneration process. Moreover, we quantified the spatial interaction of individuals for different growth states. Using an analysis of point processes we analyzed the spatial interaction between individuals from natural regeneration and their relation to the potential mother plants. In order to characterize the spatial interaction between reproductive individuals and its progeny we estimated the distance, type and range of interaction between them. Furthermore, we fitted a statistical model to predict the density of regeneration using environmental variables as predictors which describe the degree of environmental heterogeneity. Fitted models were used to identify favorable sites for natural regeneration of *J. chilensis* in the ex Hacienda Siete Hermanas. The different spatial patterns analyzed differed significantly from a random distribution pattern with a marked spatial clustering among regeneration individuals for all distance ranges analyzed, and of these with respect to adults. Results show that natural regeneration of *J. chilensis* is significantly related to higher plant cover sites. This pattern is due to the significant and positive relationship with the NDVI, especially in places with higher solar radiation which is associated to the positive relationship between density and topographic exposure. The results suggest that the generation of nuclei regeneration of *J. chilensis* is due to the proper combination of environmental conditions to the establishment of new individuals. The spatial pattern of recruitment in *J. chilensis* follows the mechanism proposed by Janzen-Connell where the increased recruitment occurs at intermediate distances from the mother plant which can suggest a concentration of individuals in areas where seedlings manage to escape seed predation and herbivory. On the other hand, significant relationship with the NDVI regeneration suggests the occurrence of a nurse effect facilitating natural regeneration of the species. This facilitating effect on survival coverage of *J. chilensis* would be mainly due to improved environmental conditions under the canopy, so that the effective dispersion occur limited by its coincidence with the regeneration niche low vegetation coverage. This work confirms the facilitation of *J. chilensis* by accompanist vegetation in their reproductive cycle. Therefore, the restoration of the species must consider the reestablishment of sclerophyllous forest elements.

Key words: Spatial explicit model, nurse effect, mediterranean climate, herbivory

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas nativos han estado continuamente bajo presión debido a las sostenidas perturbaciones humanas. Esto ha llevado a la pérdida y fragmentación de gran parte de los ecosistemas forestales en el mundo (Fisher y Linder Mayer, 2007; FAO, 2012). El continuo proceso de sustitución y degradación de los ecosistemas forestales ha significado la extinción de un número indeterminado de especies, estimándose que entre el 22 y 47% de las plantas del mundo se encuentran con algún nivel de amenaza (Pitman y Jørgensen, 2002). Los ecosistemas mediterráneos, que albergan el 60% de la población mundial, casi ya no poseen superficies remanentes sin haber recibido algún tipo de perturbación antrópica (FAO, 1997). A pesar de esto, estas regiones siguen siendo importantes focos de biodiversidad, reconocidas en la actualidad como *hotspots* con alta prioridad de conservación por contener altos niveles de riqueza florística y endemismo, además de encontrarse altamente reducidos y amenazados (Myers et al., 2000). No ajeno a esto, la región mediterránea de Chile central, desde mediados del siglo XVII ha sido severamente intervenida por actividades antrópicas que han cambiado radicalmente los ecosistemas originales (Fuentes y Hajek, 1979; Holmgren, 2002). Según Fernández et al. (2009), varias de las formaciones vegetacionales de Chile central clasificadas por Gajardo (1994), se han reducido significativamente en superficie, observándose una acelerada deforestación en los último cuarenta años, con una pérdida cercana al 40% del bosque nativo (Schulz et al., 2010).

Jubaea chilensis (Molina) Baill. es un árbol monotípico, símbolo de la flora nativa chilena y endémico de la zona central. Se le puede encontrar en distintos ambientes, con una mayor o menor densidad, en donde es considerada como un elemento típico de la distribución original del bosque esclerófilo costero (Serra et al., 1986). Actualmente se distribuye entre la Hacienda Las Palmas en la región de Coquimbo (31°15'S-71°35'O) y Tapihue en la región del Maule (35°22'S-71°47'O) (Serra et al., 1986). Sin embargo, es desconocida su distribución original por ser frecuentemente cultivada en el pasado (Cabello, 2006). A pesar de tener una amplia distribución geográfica, esta especie se presenta en poblaciones discontinuas y altamente fragmentadas por acción antrópica (González et al., 2009).

Se estima que su población actual es de 124.000 individuos en distintos estados de desarrollo (Hechenleitner et al., 2005), lo que representaría el 2,5% de la población a principios del siglo XIX (González et al., 2009). Solo dos de las tres poblaciones de mayor tamaño poblacional, en el Parque Nacional La Campana y el Parque Nacional Palmas de Cocalán se encuentran protegidas. Las demás poblaciones se encuentran confinadas en distintas zonas de la cordillera de la costa principalmente en la costa de la región de Valparaíso. Estos y otros antecedentes han llevado a clasificarla como una especie amenazada (CONAMA, 2008).

J. chilensis ha visto reducida su población original en gran parte por su explotación para la producción de miel de palma, donde es necesario el desarraigamiento de individuos de alrededor de 30 años, actividad que continúa hasta hoy (Cabello, 2006). Sin embargo, actualmente la principal amenaza para su conservación se relaciona con diferentes factores que limitan la regeneración natural de la especie (Michea, 1992;

Marcelo et al., 2006; González et al., 2009). Uno de los principales factores es la total cosecha de sus semillas. La recolección de semillas de palma es una actividad económica que se ha realizado los últimos 250 años para el consumo humano. Se encuentra escasamente regulada y se realiza incluso al interior de áreas protegidas por el Estado (González et al., 2001; Cabello, 2006), disminuyendo casi totalmente la disponibilidad de semillas para la regeneración natural de la especie (Michea, 1992). Esta actividad económica además conlleva un alto tránsito en la cercanía de los individuos reproductivos, lo que afecta también la regeneración mediante el pisoteo de plántulas (Michea, 1992). Otro de los factores que limitan la regeneración es la reducción de cobertura vegetal, debido al intensivo cambio de uso de suelo e incendios forestales (Shultz et al., 2010), disminuyendo significativamente los microhábitat que favorecen la supervivencia de semillas y plántulas (González et al., 2009). Además, si bien los incendios forestales no afectarían significativamente a los individuos adultos (González y Vita, 1987), afecta directamente la regeneración por la mortalidad de plántulas.

A estas limitantes antrópicas, se suman restricciones ecológicas que podrían a su vez condicionar el establecimiento de nuevos individuos de *J. chilensis*. El establecimiento de un nuevo individuo es el reflejo del paso de una serie concatenada de procesos ecológicos. Cada proceso podría actuar como cuello de botella demográfico en el paso de etapas sucesivas para la regeneración, cuando la probabilidad de superarla sea cercana a cero (Jordano et al., 2004). El establecimiento dependerá entonces del paso exitoso de cada una de estas etapas, como la producción de frutos, dispersión de la semilla, depredación postdispersión, germinación, sobrevivencia a la herbivoría o desecación, establecimiento, entre otros (Jordano et al., 2004). Para *J. chilensis* se ha reportado como limitantes la herbivoría, la depredación de semillas y la mortalidad por desecación de las plántulas (Yates et al., 1994; Marcelo et al., 2006)

J. chilensis es una especie monoica, con una abundante producción de frutos. Presenta en general una semilla en su interior, pudiendo ser dos o raramente tres (Cabello, 2006). La producción de frutos se favorecería en individuos expuestos a la radiación solar, inhibiéndose en lugares muy sombríos y húmedos, al igual que en rodales muy densos (Cabello, 2006). Las semillas, de 2 a 2,5 cm son dispersadas principalmente por gravedad (barocoría), por lo que la mayor proporción de semillas se concentra bajo la copa de los árboles. No existen antecedentes de dispersión secundaria, pero si hay evidencia que las semillas son depredadas preferentemente por *Octodon degus* (Yates et al., 1994). La especie tiene capacidad germinativa relativamente alta (superior al 70%), sin embargo, una energía germinativa muy baja (demora 21 meses en alcanzar ese porcentaje de germinación), exponiendo por largo tiempo las semillas a la depredación. Una vez establecida una plántula, el principal factor que afecta su sobrevivencia, al igual que en otras especies de Chile central, es la herbivoría. Se ha encontrado que la herbivoría representa el 70% de la mortalidad de plántulas para *J. chilensis* (este porcentaje se obtuvo en un seguimiento de 36 semanas), lo que resulta especialmente limitante para su regeneración, ya que *J. chilensis* no regenera vegetativamente ni puede rebrotar luego del ramoneo (Marcelo et al., 2006). Este efecto sería mayor bajo el dosel arbustivo en áreas heterogéneas, donde la cobertura podría también ofrecer refugio a micromamíferos, aumentando la herbivoría bajo el follaje (Marcelo et al., 2006), aun cuando existen antecedentes que el conejo europeo *Oryctolagus cuniculus* (principal depredador) ocuparía indistintamente diferentes microambientes (Simonetti, 1989). Por otro lado, el dosel superior cumpliría un rol facilitador en el establecimiento de las

plántulas de *J. chilensis*, ya que la mortalidad por desecación sería significativamente menor bajo árboles o arbustos (Marcelo et al., 2006). Este efecto se podría producir debido a la disminución de la temperatura y el aumento de la humedad del suelo bajo el dosel (Del Pozo et al., 1989, Gómez-Aparicio, 2004).

Debido a las variadas limitantes a la regeneración natural, en la mayoría de las subpoblaciones naturales de *Jubaea chilensis*, se evidencia una estructura poblacional regular, casi coetanea y bastante longevas (González et al., 2001, CONAMA, 2005; Cabello, 2006). En la ex Hacienda Siete Hermanas se observa una población coetanea, en donde el 90% de los individuos son adultos, con total ausencia de plántulas (Michae, 1992; Díaz, 2009). Por otro lado, los censos realizados en el Parque Nacional La Campana han reflejado una baja densidad de regeneración (Rubinstein, 1969; Michae, 1992). Díaz (2009) en prospecciones más recientes confirma esta tendencia.

El presente trabajo aborda la regeneración natural de *J. chilensis*, específicamente en la fase de reclutamiento. El reclutamiento es consecuencia del soslayar con éxito las distintas barreras naturales o antrópicas, presentes en etapas pre y postdispersivas, donde su probabilidad de ocurrencia es el producto de la probabilidad individual de pasar de una etapa a otra (Clark et al., 1999; Jordano et al., 2004). La dispersión de semillas determina el rango de distancia en los cuales podría reclutar una planta, sin embargo, esta dispersión de semillas será efectiva sólo en la medida en que coincida con un sitio en donde se configuren las condiciones para la germinación y establecimiento de la planta, es decir, en su nicho de regeneración (Grubb, 1977; Nathan y Muller-Landau, 2000). En ambientes muy heterogéneos, la discordancia espacial entre dispersión y nicho de regeneración puede llevar a la completa limitación de la regeneración (Gómez-Aparicio, 2008). La distribución espacial de los diferentes filtros a la regeneración natural no se expresan de manera aleatoria en el espacio (Jordano y Herrera, 1995), por lo que la distribución espacial de la regeneración responderá necesariamente a la heterogeneidad del ambiente, pudiéndose observar en algunos casos patrones agrupados de distribución (Gómez-Aparicio, 2008). En ecosistemas mediterráneos, debido a las limitantes a la regeneración, se ha observado el rol preponderante de la interacción planta-planta facilitando la regeneración natural (Gómez-Aparicio et al., 2004; Gómez-Aparicio, 2008). Este mecanismo es clave en la regeneración natural observada en los bosques esclerófilo de Chile central, observándose un proceso de nucleación a cortas distancias de parches remanentes de bosque (Fuentes-Castillo et al., 2012).

Una primera aproximación para entender el proceso de regeneración natural, es mediante la determinación de la interacción espacial entre los individuos de regeneración, o de la regeneración en función a los adultos. La distancia a la cual se encuentra un individuo de otro puede ser reflejo del mecanismo de dispersión de semillas, depredación, facilitación, competencia, entre otros, o debido a limitaciones del ambiente lo cual definirá la estructura espacial de la población. En segundo lugar, entender cómo la heterogeneidad espacial afecta la regeneración natural, permite delimitar condiciones en las cuales este proceso se pueda ver favorecido o limitado, evidenciando relaciones de los individuos con su medio ambiente.

Es clave entender los factores que facilitan la regeneración natural, identificando así *hotspot* de regeneración para la implementación de medidas de restauración en sitios donde tengan una mayor probabilidad de éxito (Jordano et al., 2004).

Patrones y procesos puntuales

Una de las formas más comunes de analizar la interacción espacial entre plantas, es mediante el enfoque de análisis espacial de patrones puntuales (Fortín y Dale, 2005; Law et al., 2009). Según Diggle (2003), un proceso puntual es un mecanismo aleatorio que genera un set de puntos con una ubicación discreta en el espacio y el tiempo, los cuales usualmente se obtienen en dos dimensiones y en un área finita. En ecología forestal, cada punto representa la ubicación espacial de un individuo, representado por sus coordenadas geográficas. Además, pueden ser categorizados con algún atributo que lo describa no solo en función de su localización en el espacio, sino en función de alguna característica cualitativa o cuantitativa (e.g. dap, edad, estado sanitario, estado de desarrollo, etc.). Un patrón de puntos es la expresión espacial de algún proceso o concatenación de procesos desconocidos que puede ser representado como un punto en el espacio con coordenadas (x,y) o (x,y,z) . Estos representan la posición de todos los eventos ocurridos en una ventana espacial predefinida, por lo que representan un censo al interior de la ventana de estudio. Se asume que este patrón es la representación de un proceso común para todos los eventos observados en el espacio definido (Fortin y Dale, 2005).

Los patrones de puntos pueden ser estudiados desde dos perspectivas diferentes, y que representan las dos propiedades intrínsecas de cada patrón. En primer lugar, al representar la totalidad de eventos ocurridos en un espacio predefinido, se puede realizar un análisis de primer orden o intensidad del patrón, representado por el número de puntos ocurridos por unidad de superficie, lo que expresa la densidad del fenómeno estudiado o la probabilidad de encontrar un punto en una ubicación dada al interior de la ventana espacial considerada (Fortin y Dale, 2005). La densidad puede ser un proceso constante a través del espacio (proceso homogéneo), resultando en un patrón estacionario, o puede variar espacialmente, generando tendencias de densidad, lo que generaría un patrón inhomogéneo de distribución. La inhomogeneidad del patrón se puede deber a la relación del proceso observado con alguna variable ambiental, por lo que la función de densidad de un proceso inhomogéneo es dependiente del valor de la variable ambiental en cada punto en el espacio (Baddeley y Turner, 2005; Law et al., 2009). Por otro lado, se puede realizar un análisis de segundo orden, estudiando la distribución espacial de la densidad en función a la interacción entre puntos. En este caso, la función de densidad es dependiente de la distancia entre pares de puntos, los cuales pueden tener diferentes intensidades y tipos de interacción (Baddeley y Turner, 2006). Se pueden analizar la interacción entre eventos pertenecientes al mismo patrón de puntos (análisis univariante), o analizar la interacción espacial entre dos o más patrones de puntos diferentes (análisis bivariante o multivariante) (Salas et al., 2006; De la Cruz, 2008; Law et al., 2009).

En el presente trabajo, mediante un análisis de procesos puntuales, se analizó la interacción espacial entre individuos provenientes de regeneración natural, y de ellos en relación a las posibles plantas madres, determinando la distancia, el tipo y rangos de interacción. Se construyó además un modelo estadístico para predecir la densidad de individuos regeneración en el espacio geográfico, asociando a diferentes variables ambientales. Finalmente se utilizó el modelo ajustado para identificar sitios favorables para la regeneración natural de *J. chilensis* en la ex Hacienda Siete Hermanas.

Considerando la estrategia de dispersión de *J. chilensis* (barocoría) y los requerimientos ambientales para su establecimiento, las hipótesis de este trabajo son: 1) La regeneración natural de individuos de *J. chilensis* se produce de manera agregada. 2) El establecimiento de nuevos individuos se produce a cortas distancias de los individuos adultos. Y, debido a la desecación de las plántulas en época estival, 3) La mayor densidad de regeneración se encontraría asociada a sitios con mayor cobertura vegetal.

Objetivo General

Evaluar el patrón de distribución espacial de la regeneración natural de *Jubaea chilensis*.

Objetivos Específico

- 1.- Caracterizar la interacción espacial de individuos de regeneración y adultos de *Jubaea chilensis*.
- 2.- Evaluar las condiciones ambientales relacionadas con la densidad de regeneración natural de *Jubaea chilensis*.
- 3.- Identificar sitios al interior de la ex Hacienda Siete Hermanas que presenten condiciones favorables para la regeneración de *Jubaea chilensis*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en dos áreas de la región de Valparaíso, en el sector Palmas de Ocoa del Parque Nacional la Campana (35°55'S, 71°5'W), y en la ex Hacienda Siete Hermanas (33°45,5'S, 71°32' W) (Figura 1). Ubicados dentro del tipo climático mediterráneo, se caracterizan por la existencia de una estación lluviosa en invierno (mayo-agosto) y por una estación seca más prolongada (septiembre-abril). Pertenecen a la formación vegetal del bosque esclerófilo mediterráneo costero de *Lithaea caustica* y *Cryptocaria alba*, el cual es caracterizado por la dominancia de *Lithaea caustica* asociado principalmente a *Cryptocaria alba*, *Peumus boldus* y *Schinus latifolius* (Luebert y Pliscoff 2005). Ambos sitios de estudio corresponden a dos poblaciones aisladas de la especie, con un alto valor de conservación, debido a que corresponden a las poblaciones más abundantes junto con la ubicada en la Hacienda Las Palmas de Cocalán (Michea, 1992).

El sector del palmar de Ocoa corresponde a una microcuenca con exposición predominantemente norte, ubicado en la vertiente de sotavento, debido al efecto de bombo climático causado por la cordillera de la costa. Esto genera una disminución en las precipitaciones y humedad relativa con respecto a los otros sectores del parque nacional, alcanzando una pluviosidad aproximada de 300 mm/año (Pliscoff, 2002). En este sector habría aproximadamente 63.000 individuos de la especie (Michae, 1992), encontrándose distribuidos entre los 400 y los 1400 msnm. Se distribuyen en diferentes condiciones microambientales, con sectores de alta densidad, ubicados principalmente en las partes bajas del valle, y en las quebradas con mayor y regular disponibilidad de agua hasta los 800 msnm (Michea, 1992). En este sector, *Jubaea chilensis* se encuentra asociada principalmente a los árboles *Cryptocaria alba*, *Quillaja saponaria*, *Lithaea caustica*, *Peumus boldus* y a las especies del matorral espinoso *Retanilla trinervia* y *Acacia caven* (Elórtegui y Moreira 2002). Por otro lado, el sector de Siete Hermanas está compuesto por una serie de quebradas orientadas de sur a norte, angostas y con fuertes pendientes, con alturas que oscilan entre los 150 y 350 msnm. Se caracteriza por tener una fuerte influencia de las neblinas costeras, teniendo un régimen hídrico de 400 mm/año. *Jubaea chilensis* se encuentra asociada en las zonas menos degradadas con especies del bosque esclerófilo como *Cryptocaria alba*, *Peumus boldus*, y con especies de matorral como *Chusquea cumingii*, *Aristotelia chilensis* y *Retanilla trinervia* (Michae, 1992)

Si bien las áreas de estudio corresponden a sitios categorizados como prioritarios para la conservación de *Jubaea chilensis*, éstos presentan condiciones contrastantes para su conservación y manejo. El palmar de Ocoa corresponde probablemente a la población en mejor estado de conservación, en donde si bien se realiza un aprovechamiento económico de la especie, estaría controlado por la Corporación Nacional Forestal (CONAF). De acuerdo a Díaz (2009) y Michae (1992), en este sitio *Jubaea chilensis* tendría una estructura multietánea y multiestratifica, sin embargo presenta una baja densidad de regeneración natural con un promedio de 10,9 plántulas/ha. Por otro lado, si bien el sitio de Siete Hermanas fue declarado como sitio prioritario para la conservación de la biodiversidad, éste no cuenta con protección oficial. Esto queda reflejado en los resultados obtenidos por Díaz (2009), el cual encontró una estructura coetánea,

envejecida, sin regeneración natural, similar a las condiciones encontradas por Michael (1992). El sector de Siete Hermanas, a pesar de encontrarse muy intervenido a raíz de incendios, obras viales y expansión del casco urbano, pueden encontrarse sectores de menor intervención, en donde la *J. chilensis* se asocia con especies como *Cryptocarya alba* o *Peumus boldus* e incluso se encuentran en lugares con una gran riqueza florística (Flores y Aguirre, 2008; Michea, 1992), lo que refleja que a pesar de las intervenciones antrópicas, aún pueden existir sitios potenciales para la regeneración de la Palma, y que podrían ser guía o sitios claves de un eventual plan de conservación o restauración en el sector.

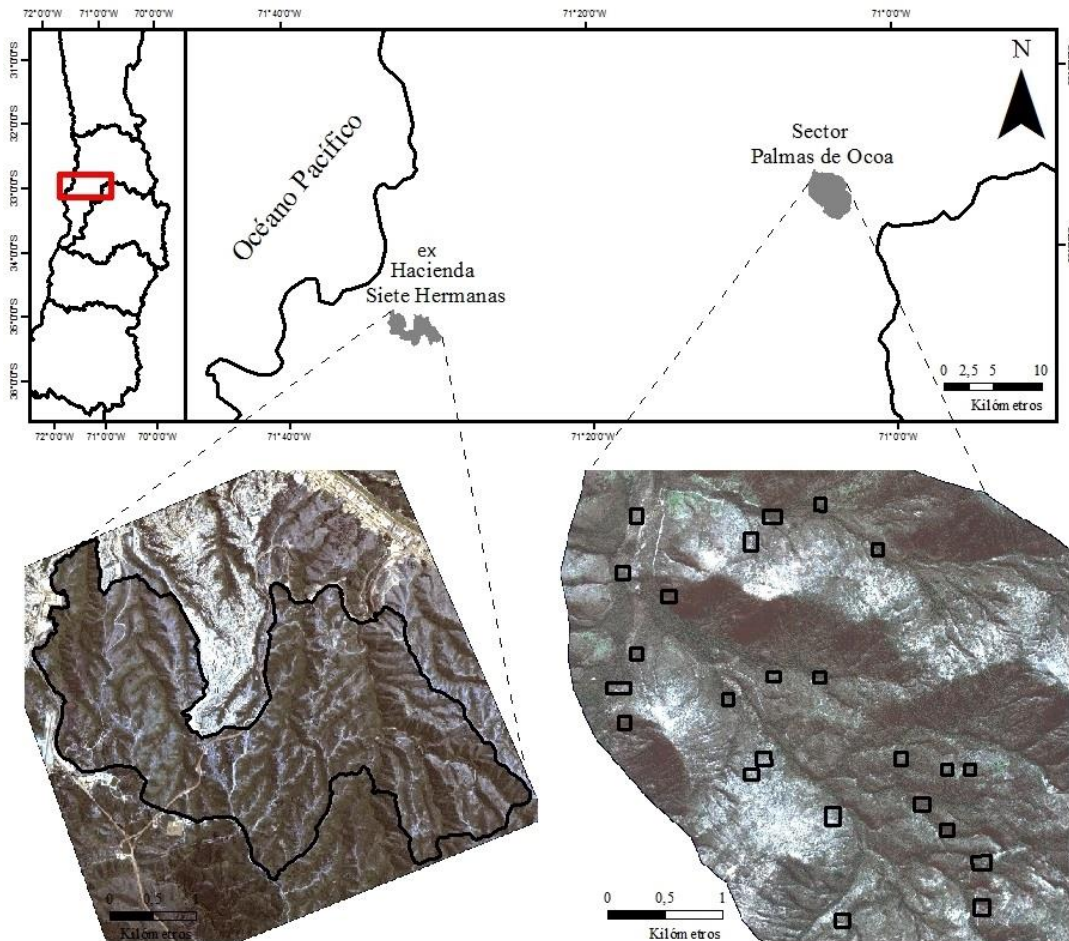
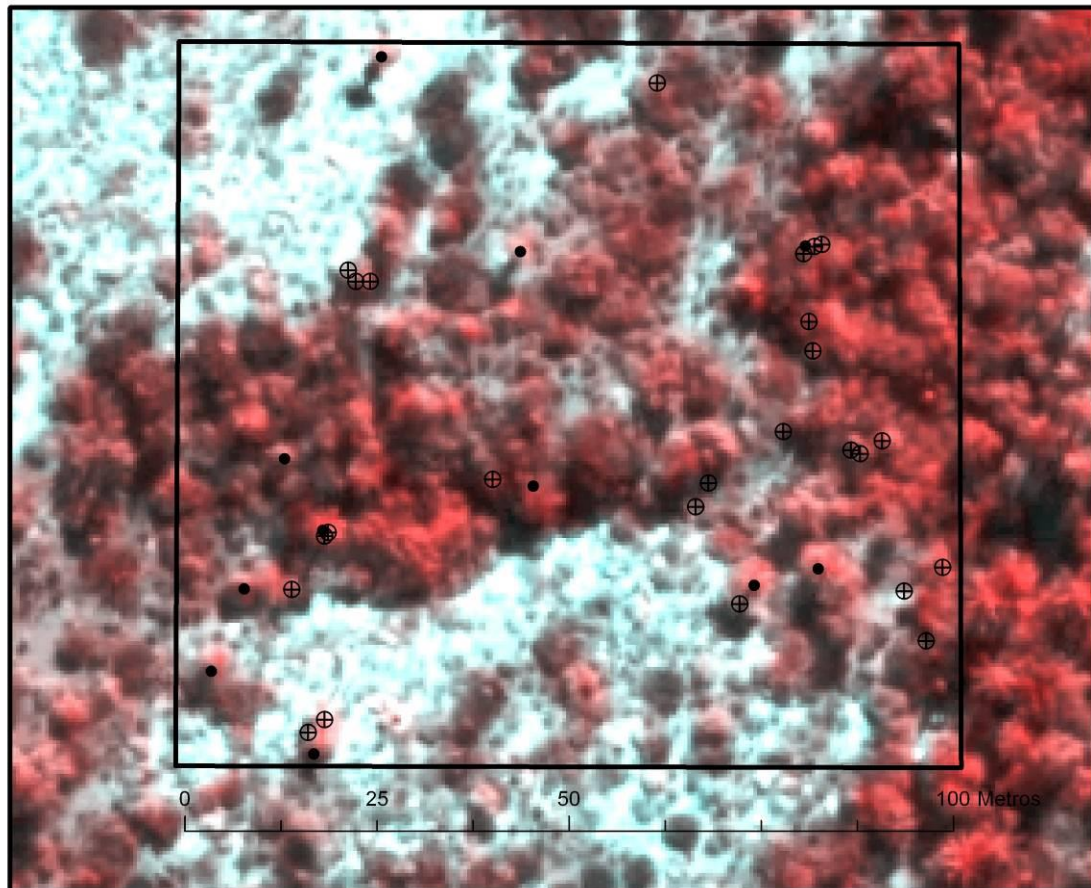


Figura 1: Ubicación áreas de estudio. Izquierda abajo: límite del área de estudio ex Hacienda Siete Hermanas. Derecha abajo: Distribución de parcelas de muestreo en el sector de Palmas de Ocoa, en el parque nacional La Campana.

Datos

Localización geográfica individuos

En el sector de Ocoa, se distribuyeron homogéneamente 24 parcelas de 100x100 m, en las cuales se determinó la posición geográfica de cada individuo, utilizando un sistema cartesiano definido en terreno (Figura 2). Luego, mediante el posicionamiento geográfico del punto de origen por medio de un GPS, se transformó cada coordenada relativa a un sistema de coordenadas estándar, específicamente transformado a WGS84 UTM Zona 19s. Para mayor detalle sobre el procedimiento en terreno ver Díaz (2009). Cada individuo se caracterizó en función de su estado de desarrollo en: individuos adultos: definidos así por encontrarse en el periodo reproductivo (producción de frutos), e individuos de regeneración: correspondientes a los individuos que se encuentran en estados de desarrollo tempranos, los cuales aun no han alcanzado su periodo reproductivo.



Límite parcela
 ● Individuos adultos
 ⊕ Individuos de regeneración

Figura 2: Ubicación geográfica de los individuos de regeneración y adultos en una parcela del sector Palmas de Ocoa. En el fondo: imagen obtenida por el satélite Quickbird en composición falso color.

Métodos

Caracterización de la interacción espacial de individuos en diferentes estados de desarrollo de *Jubaea chilensis*.

El análisis de procesos puntuales se basa fundamentalmente en la relación entre pares de puntos o de un patrón de puntos con otro (e.g. regeneración vs adultos). Para la identificación del tipo de patrón de distribución espacial de la regeneración de *Jubaea chilensis* con respecto a los adultos, se utilizó la función K de Ripley (Ripley, 1981), que corresponde a uno de los métodos más utilizados en el análisis de patrones puntuales (Pelissier y Goreaud, 2001; Wiegand y Moloney, 2004; Rozas y Camarero, 2005; Law et al., 2009). Puede interpretar a distintas escalas la relación espacial entre individuos de una población, en donde queda reflejado el tipo (agregado, aleatorio o repulsivo), intensidad (que tan agregado o repulsivo) y rango (entre qué distancias se producen estos procesos) de la interacción espacial (Dixon, 2001). Un patrón agregado consiste en que la mayor proporción de puntos ocurren en la vecindad o a cortas distancias de otros puntos. Por otro lado, un patrón repulsivo o regular consiste en que la mayor proporción de puntos ocurren a cierta distancia mínima desde el individuo más cercano. Es posible observar en un mismo patrón de puntos ambos procesos en diferentes rangos de distancia.

Para caracterizar el patrón de distribución espacial de la regeneración de *Jubaea chilensis* en el sector de Ocoa, se realizó un análisis univariante entre los individuos de regeneración, y un análisis bivariante para los individuos de regeneración en función de los adultos, para mayor detalle y definición del tipo de análisis ver el Apéndice 1.

Interpretación análisis univariado y bivariado

Tanto en el caso univariante como bivariante, la hipótesis (Hipótesis nula: no hay interacción) se pone a prueba mediante la construcción de intervalos confidenciales a través de la simulación de n patrones puntuales aleatorios con la misma densidad del patrón observado. Con esto se obtienen los rangos dentro de los cuales se podría asumir que el patrón observado tiene una distribución aleatoria. Así, si el patrón de puntos observado presenta una mayor densidad de puntos que el patrón aleatorio (más puntos a cierta distancia que en un patrón aleatorio), se asume que el patrón observado presenta una agregación en ese rango de distancia, y por el contrario, si el patrón de puntos observado tiene una menor densidad de puntos a cierta distancia que en un patrón aleatorio, se asume que éste presenta repulsión a cierta distancia entre los puntos (De la Cruz Rot, 2006). Para el cálculo de $K(r)$, se utilizó un r máximo de 25 m, debido a posibles errores de interpretación en distancias mayores a 1/3 de la ventana con el lado de menor longitud (Baddeley y Turner, 2005)

Para la interpretación de los resultados, Basag (1977) propuso el cálculo de $L(r)$, que permite una interpretación más sencilla.

$$L(r) = \sqrt{\frac{K(r)}{\pi}} - r \quad (3)$$

Donde $L(r) > 0$ indica un patrón agregado, $L(r) < 0$ indica repulsión y $L(r) = 0$ indica aleatoriedad o independencia en la distribución de los puntos.

Para poner a prueba la hipótesis nula en cada caso, se construyeron límites confidenciales mediante la simulación de 10.000 patrones aleatorio de puntos con la misma densidad que el patrón observado, a los cuales se les calculó la función $K(r)$ (Apéndice 1) y $L(r)$. Con esto se generó envueltas que permiten comparar visualmente el patrón observado versus un patrón aleatorio o independiente. Si el patrón observado supera el límite superior de las envueltas, se interpreta como un agrupamiento de los puntos. Y si el patrón observado supera el límite inferior de las envueltas, se interpreta como repulsión espacial entre los puntos, ya que diferirían significativamente de la aleatoriedad (Salas et al., 2006). Este análisis no corresponde estrictamente a la construcción de intervalos de confianza, pero si especifican los valores críticos para el test de Monte Carlo (Ripley 1981), donde la hipótesis nula es rechazada, si los valores observados se encuentran por fuera de las envueltas construidas, en ese específico rango de distancia r . El nivel de significancia del test puede ser calculado mediante la ecuación 4 (Baddeley y Turner, 2012):

$$\alpha = \frac{2 * nrank}{1 + nsim} \quad (4)$$

En la ecuación 4 $nrank$ corresponde al rango de valores utilizados para construir las envueltas. Siendo el valor 1 el que representa la utilización del valor máximo y mínimo de los datos simulados. Y $nsim$ corresponde al número de simulaciones realizadas.

Evaluación de las condiciones ambientales relacionadas con la densidad de regeneración natural de *Jubaea chilensis*.

Se construyó un modelo estadístico en donde se relacionó la densidad de individuos de regeneración (variable respuesta), y diferentes variables ambientales (variables predictoras).

Variables ambientales

Para el sector de Ocoa como para la ex Hacienda Siete Hermanas se construyeron, en formato raster, ocho variables espacialmente explícitas mediante la utilización de software de análisis espacial *ERDAS 8.6* y *Arcgis 9.3*. Cada variable fue construida en base a una grilla de 5x5 metros. Se construyeron variables comúnmente utilizadas en análisis espacial y que pueden potencialmente influir en la dinámica de regeneración natural del *Jubaea chilensis*. Representan las condiciones abióticas e interacciones ecológicas que puedan determinar el patrón espacial de distribución de individuos de regeneración. Describen la interacción de los individuos de regeneración con las condiciones ambientales en su entorno inmediato, especialmente las determinadas por la topografía, además de interacciones bióticas que eventualmente pueden determinar la distribución espacial y densidad de los individuos de regeneración (Jordano et al, 2004). Las variables construidas presentan una estructura de datos continuos, con rangos dependientes de la variable en particular:

- Variables ambientales
 - Elevación (modelo digital de elevación)
 - Distancia a los fondos de quebrada
 - Exposición

- Pendiente
- Índice de humedad topográfico (topographic wetness index - TWI)
- Distancia a individuo adulto más cercano
- Densidad de individuos adultos
- Índice de diferencia normalizado de vegetación (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI)

El modelo digital de elevación se construyó mediante el análisis de estereopares de fotografías aéreas utilizando el principio de paralaje. El término paralaje se define como la diferencia aparente en la posición relativa de un objeto estático, debido a el cambio de posición del observador (Lillesand et al., 2008). Por medio del cálculo del paralaje utilizando fotografías aéreas, es posible obtener un modelo digital de elevación mediante el proceso descrito en el Apéndice 2, utilizando el módulo *Imagine OrthoBase* implementado en el software *Erdas 8.6* (ERDAS, 2002). Para esto, se adquirieron cinco fotografías aéreas; tres para el área de Siete Hermanas y dos para el sector de Ocoa. Las imágenes corresponden a pares estereoscópicos adquiridos por el Servicio Aerofotogramétrico de Chile en el vuelo FONDEF del año 1994, con una escala 1:20.000.

Las variables topográficas fueron calculadas a partir del modelo digital de elevación. La pendiente y la exposición fueron calculadas utilizando el módulo *Spatial Analyst* de implementado en el software *Arcgis 9.3*. El índice de humedad topográfico (topographic wetness index - TWI), es un indicador del potencial de disponibilidad de agua (Beven y Kirkby, 1979; O'Loughlin, 1981), es calculado como el $\ln(a/\tan b)$, donde b es la pendiente de la superficie analizada y a es la superficie aportante sobre cada punto, calculado como $a = A/L$, donde A (en m²) es la superficie aportante sobre cada punto y L (en metros) es la longitud de la isolinia. Los valores mayores de TWI representan zonas relativamente planas con grandes áreas aportante de humedad (fondos de quebrada), donde es esperable encontrar una mayor disponibilidad de agua que en zonas con pendientes mayores o con menores superficies aportantes (Wilson y Gallant, 2000). Para el cálculo de la distancia desde los fondos de quebradas, fue primero necesario calcular las zonas de acumulación hídrica, delineando los fondos de quebradas con una superficie mínima de área de acumulación de 1 hectárea. Este análisis se realizó en el módulo *Hydrology* implementado en el software *Arcgis 9.3*, siguiendo el procedimiento descrito por CATHALAC (2009). La distancia a los fondos de quebrada fue calculada utilizando el módulo *Spatial Analyst* implementado en el software *Arcgis 9.3*.

La construcción de las variables descriptivas de la interacciones bióticas, que puedan determinar la distribución espacial y la densidad de individuos de regeneración de *Jubaea chilensis*, fueron construidas a partir de diferentes fuentes de información. La interacción de la regeneración con individuos adultos fue cuantificada mediante el cálculo de la distancia al individuo adulto más cercano. Para esto se utilizaron los datos obtenidos en el censo georreferenciado de palmas realizado por Díaz (2009). Se utilizaron los datos obtenidos en terreno mediante la metodología descrita anteriormente (Figura 2). Díaz (2009) detectó los individuos adultos observados en el área mediante un análisis visual, utilizando una imagen Quickbird II capturada en marzo del año 2006. El censo realizado por Díaz (2009) obtuvo un error de comisión de 3,88% y de omisión de 35,88%. Para representar el grado de cobertura del suelo, se construyó una variable representativa de la presencia de vegetación en el área de estudio. Para esto, la imagen Quickbird II fue preprocesada a través de la fusión de imágenes mediante el módulo

merge implementado en el software ERDAS 8.6. En el proceso se incrementa la resolución de las bandas multiespectrales por medio de la fusión de éstas con la banda que registra información espectral en el rango del pancromático. Con esto, se obtiene una imagen multiespectral con una resolución espacial de 0,6 metros. Posteriormente, la imagen Quickbird II, fue transformada a radiancia mediante el procedimiento señalado por Krause (2003). Se calculó el índice de diferencia normalizado de vegetación (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI) utilizando la fórmula $(NIR-R)/(NIR+R)$, donde NIR corresponde a la banda espectral ubicada en el rango espectral del infrarrojo cercano (760-900 nm), y R es la banda ubicada en el rojo (630-690 nm). Los valores mayores representan vegetación sana, con una mayor actividad fotosintética (Lillesand et al., 2008).

Modelación de la densidad de individuos de regeneración y condiciones ambientales relacionadas

Para la construcción del modelo, se utilizó el mismo patrón de puntos utilizado para los análisis de K de Ripley, asumiendo que todos los puntos comparten la misma estructura espacial, es decir, que se pueden describir mediante un proceso común. Se utilizaron todos los individuos de regeneración para el ajuste de los modelos, y se utilizó como ventana de distribución las 24 parcelas prospectadas en terreno, independiente de la presencia o no de regeneración. Se ajustaron modelos de la familia de Poisson, muy utilizados en ecología forestal (Penttinen y Stoyan, 2000). Se ajustaron 19 modelos con una diferente combinación de variables ambientales (proceso inhomogéneo de Poisson), además de un modelo que describe la distribución aleatoria de los individuos de regeneración o proceso homogéneo de Poisson. El modelo construido es equivalente a un modelo lineal generalizado de la familia de Poisson, donde la variable respuesta es la densidad de puntos por unidad de área. Para un proceso homogéneo, los puntos se distribuyen siguiendo una distribución de Poisson, y para un proceso inhomogéneo de Poisson, la densidad es dependiente de las variables ambientales (variables predictoras) (Baddeley y Turner, 2000). Una mayor descripción de los diferentes procesos de Poisson en Apéndice 3.

Selección del modelo

La selección del modelo se centra en la capacidad predictiva de los modelos ajustados. Se calculó el error medio cuadrático de la predicción de los modelos, comparando el patrón observado en las veinticuatro parcelas y el predicho por el modelo. Esto se realizó mediante cuadrantes de 1000 m². Se seleccionó el modelo con el menor índice AIC (Akaike, 1973). Adicionalmente se calculó el error de predicción de la densidad de individuos de regeneración.

Adicionalmente, se realizó un proceso de validación del modelo, en cuanto a su capacidad de dar cuenta de la interacción espacial de los individuos de regeneración. Al igual que en el análisis de K de Ripley, se contrasta el patrón espacial observado con el predicho por el modelo. Para esto se realizó el proceso de Monte Carlo en donde la hipótesis en la que se basa el proceso de validación es que los datos observados parecen ser una realización típica del modelo (Waller *et al.*, 2003). Se generaron 10.000 realizaciones del modelo mediante un proceso de simulación, con lo cual se construyeron los límites confidenciales, dentro de los cuales el modelo predeciría correctamente el patrón observado.

Identificación de sitios al interior de la ex Hacienda Siete Hermanas que presenten condiciones favorables para la regeneración natural de *Jubaea chilensis*.

Para la identificación de sitios con mayor potencial para la regeneración natural en Siete Hermanas, se predijo el mejor modelo ajustado con el patrón observado en el sector de Ocoa, utilizando las mismas variables ambientales seleccionadas por el modelo. Para esto, se construyeron para el sector de Siete Hermanas las variables detectadas como significativas en la predicción de la densidad de individuos de regeneración, utilizando la metodología descrita para la construcción de variables ambientales en el sector de Ocoa. La variable distancia a los individuos adultos se construyó utilizando el censo realizado por Díaz (2009), el cual tiene un error de comisión de 3,88% y un error de omisión de 35,88%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las veinticuatro parcelas prospectadas en terreno se encontraron 300 individuos adultos y 229 de regeneración. Considerando plántulas e individuos infantiles la densidad media de regeneración fue de 9,6 ind/ha, con un rango de 0 a 22,7 ind/ha. Las parcelas se distribuyen entre zonas con baja y media densidad de regeneración, de acuerdo a los rangos establecidos por Michae (1992), se encontraron 14 parcelas de baja densidad y 10 de media densidad.

*Caracterización de la interacción espacial de individuos en diferentes estados de desarrollo de *Jubaea chilensis*.*

Los diferentes patrones espaciales analizados, interacción entre individuos adultos, interacción entre individuos de regeneración, y de los individuos de regeneración en función a los adultos, difirieron significativamente de un patrón de distribución aleatorio ($p < 0.001$).

La distribución espacial de la regeneración es altamente variable, encontrando parcelas en presencia de individuos adultos sin regeneración y otras con grupos de 3-4 individuos regenerando a cortas distancias entre ellos. En la transformación $L(r)$ (Ecuación 3) del análisis $K(r)$, se observa una notoria agrupación espacial entre los individuos de regeneración para todos los rangos de distancia analizados (Figura 3), agrupamiento que es relativamente constante desde los 5 m. Esto implica que para todos los rangos de distancia analizados, cada individuo de regeneración tiene más vecinos coetáneos que los esperados por una distribución aleatoria de renuevos en el espacio.

Entre los individuos adultos, al igual que la regeneración, se observa una interacción espacial agrupada. Sin embargo, con una menor intensidad que lo observado para individuos de regeneración, siendo incluso cercano a una distribución aleatoria a cortas distancias. La interacción entre individuos adultos se hace más agrupada en rangos de distancia mayores (Figura 3). Se encontró una distancia mínima entre individuos adultos de 0,2 m, y una distancia media de 14,4 m.

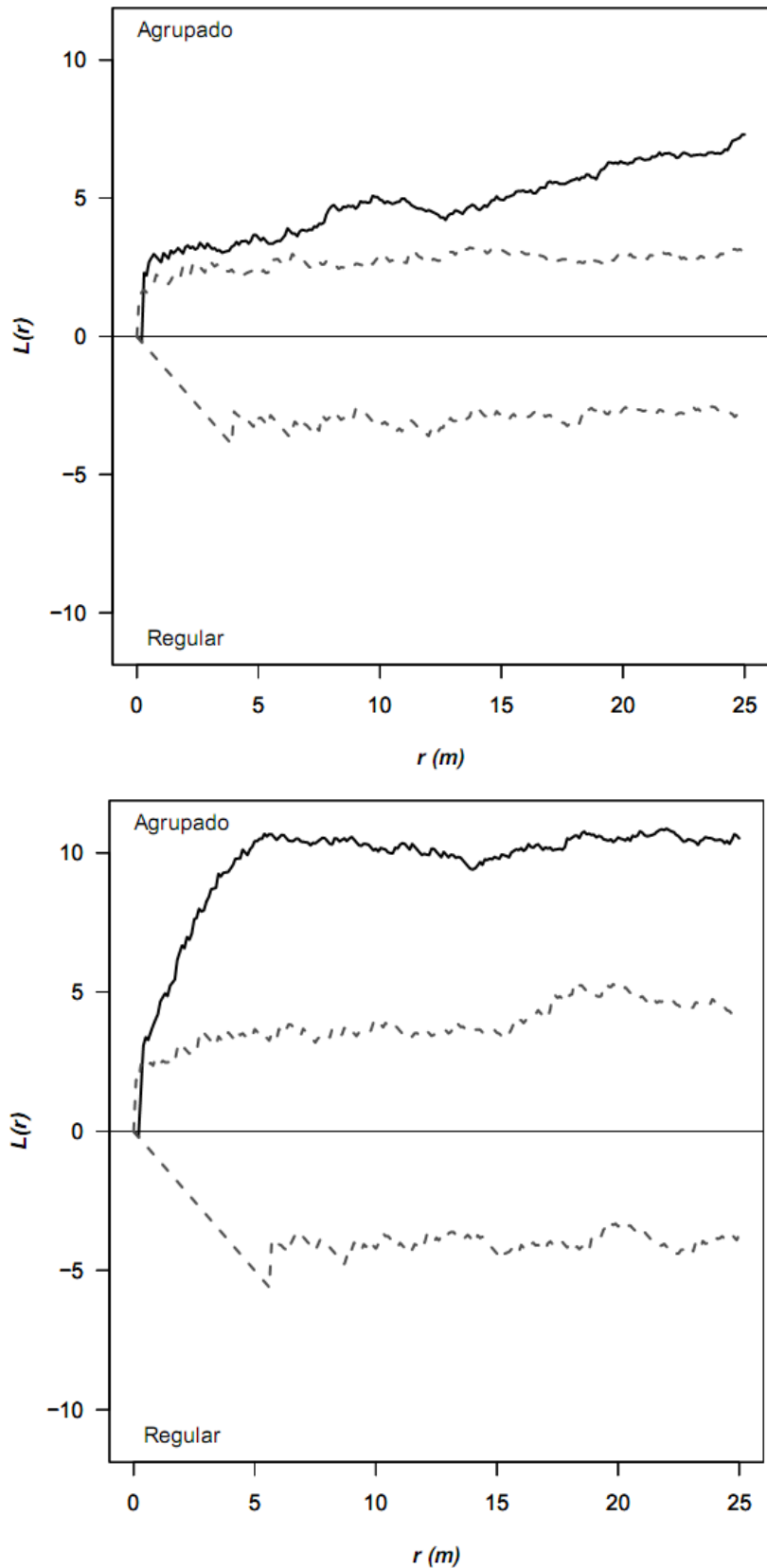


Figura 3: Estadístico $L(r)$ de la interacción espacial entre individuos de *Jubaena chilensis*. Arriba: entre individuos adultos, siendo r la distancia de interacción. Abajo: entre individuos de regeneración. La línea continua corresponde al patrón observado; la línea discontinua representa el intervalo de confianza >95% para un proceso de distribución aleatoria.

El patrón observado de la interacción espacial entre los individuos de regeneración y los adultos (análisis bivariado), muestra una distribución agrupada de la regeneración en torno a los adultos (Figura 4). Esta interacción es más intensa en un intervalo entre los 5 y 7 m, donde se observa la mayor densidad de individuos de regeneración. El 48% de los individuos de regeneración se encuentran a menos de 8 metros de un posible árbol madre. Por otro lado, el patrón observado muestra además una interacción a cortas distancias que no difiere o es muy similar a una distribución aleatoria hasta aproximadamente los 2 m desde la planta madre. El agrupamiento de la regeneración hacia los adultos se mantiene a mayores rangos de distancia, en donde es relativamente constante luego de los 12 m aproximadamente.

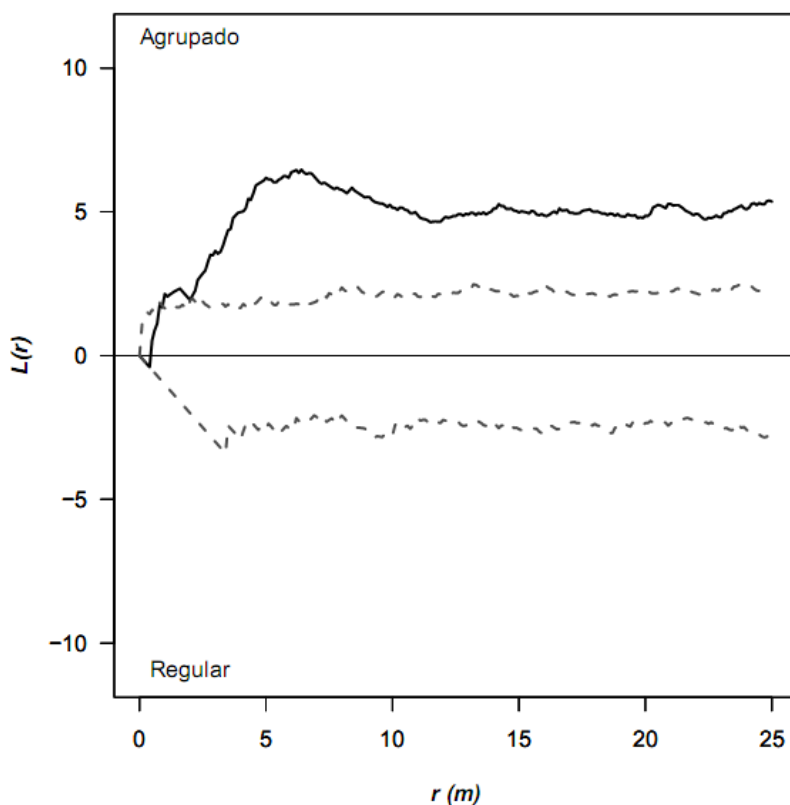


Figura 4: Estadístico $L(r)$ de la interacción espacial entre individuos de regeneración en función a los adultos de *Jubaea chilensis*, siendo r la distancia de interacción. La línea continua corresponde al patrón observado; la línea discontinua representa el intervalo de confianza $>95\%$ para un proceso espacial aleatorio.

Modelación de la densidad de individuos de regeneración y condiciones ambientales relacionadas

El modelo de referencia básico para la modelación de procesos puntuales es el proceso homogéneo de Poisson, el cual asume que los puntos están distribuidos aleatoriamente, sin influencia de las variables ambientales. Éste asume independencia de la regeneración con elementos bióticos o abióticos de medioambiente. El modelo homogéneo de Poisson mostró los valores más bajos en los parámetros de evaluación utilizados para la selección del modelo, evidenciando la influencia de la variabilidad ambiental en el proceso de regeneración de *Jubaea chilensis*.

El modelo seleccionado muestra alta correlación entre la densidad observada y predicha por el modelo ($r = 0,71$), mostrando además el mayor índice AIC y el menor error de estimación (Cuadro 1). El análisis de varianza ANOVA, muestra que el 20% de la varianza es explicada por este modelo. El modelo seleccionado retuvo tres de las ocho variables utilizadas inicialmente como predictores la densidad de individuos de regeneración. Las variables que mejor explicaron la densidad de regeneración fueron: distancia a individuo adulto más cercano, NDVI y la exposición (norte-sur), todos con parámetros altamente significativo (Cuadro 2). El modelo predice que la mayor densidad de regeneración natural ocurriría en sitios donde se conjugue la presencia de individuos adultos, aumentando la densidad a una menor distancia hacia ellos, en sitios con mayor cobertura vegetal, reflejado en la relación significativa positiva con el NDVI, y especialmente en sitios con una mayor radiación solar, expresado en la relación positiva entre densidad y exposición topográfica norte. La distribución de las variables en sitios donde se observa regeneración, evidencia un nicho de regeneración dependiente de la presencia de especies acompañantes que podrían actuar como especies nodrizas. Se observa a su vez una clara vinculación entre la presencia de individuos de regeneración y las variables ambientales seleccionadas por el modelo, especialmente la distancia a los individuos adultos y el NDVI.

El modelo muestra un error medio cuadrático de aproximadamente 1 individuo por cada 1000 m². Relativamente alto considerando la baja densidad de regeneración observada en Ocoa (rango de 0 a 22,7 ind/ha). Al simular el modelo en el sector de Ocoa (10.000 simulaciones), el modelo predice en promedio 167,1 individuos para todas las parcelas prospectadas en Ocoa (min.:135, máx.:217), un 30% menos de individuos de regeneración que los observados. Esto también se ve reflejado en la interacción espacial de individuos de regeneración, en donde al comparar el patrón espacial de distribución observado, por el predicho por el modelo (10.000 simulaciones), éste subestima el agrupamiento, especialmente a cortas distancias (Figura 3). Sin embargo, la presencia/ausencia de individuos de regeneración, es predicha correctamente por el modelo, acertando en un 61% de la presencia de al menos un individuo de regeneración, y en un 80% de las ausencias.

Modelo	AIC	r	EMC
~	3641,7	0,629	1,15
~ndvi	3463,3	0,640	1,18
~distAd	3463,7	0,671	1,12
~north	3511,5	0,633	1,14
~dem	3512,2	0,629	1,15
~easting	3512,3	0,630	1,15
~twi	3511,9	0,626	1,15
~denAd	3471,9	0,654	1,12
~ndvi + distAd + north + dem + easting + twi + denAd	3432,2	0,698	1,08
~ndvi + distAd + north + easting + twi + denAd	3431,7	0,705	1,07
~ndvi + distAd + easting + twi + denAd	3440,3	0,626	1,08
~ndvi + distAd + easting + denAd	3438,3	0,627	1,08
~distAd + easting + denAd	3461,7	0,622	1,08
~ndvi + easting + denAd	3443,7	0,617	1,08
~ndvi + distAd + denAd	3437	0,624	1,07
~ndvi + distAd + easting	3440,5	0,628	1,08
~ndvi + distAd + north	3428,2	0,710	1,06
~easting + denAd	3473,9	0,616	1,08
~easting + distAd + ndvi	3440,5	0,628	1,08
~ndvi + distAd	3439,2	0,624	1,08

Cuadro 1: Evaluación de modelos inhomogéneos de Poisson con diferente combinación de covariables. Donde ndvi: índice normalizado de vegetación, distAd: distancia al adulto más cercano, north: \cos (exposición* $\pi/180$), easting: \sin (exposición * $\pi/180$), dem: elevación, twi: índice de humedad topográfica, denAd: densidad de individuos adultos. Se muestran el índice de Akaike (AIC), el coeficiente de correlación entre lo observado y lo predicho (r) y el error medio cuadrático (EMC).

	Coefficientes	Error est.	test Z	IC95.bajo	IC95.alto
Intercepto	-9.311	0.523	na	-10.337	-8.284
ndvi	4.383	0.752	***	2.908	5.859
disAd	-0.035	0.007	***	-0.048	-0.021
north	0.439	0.125	***	0.193	0.684

Cuadro 2: Modelo inhomogéneo de Poisson seleccionado. Donde ndvi: índice normalizado de vegetación, distAd: distancia al adulto más cercano, north: \cos (exposición* $\pi/180$).

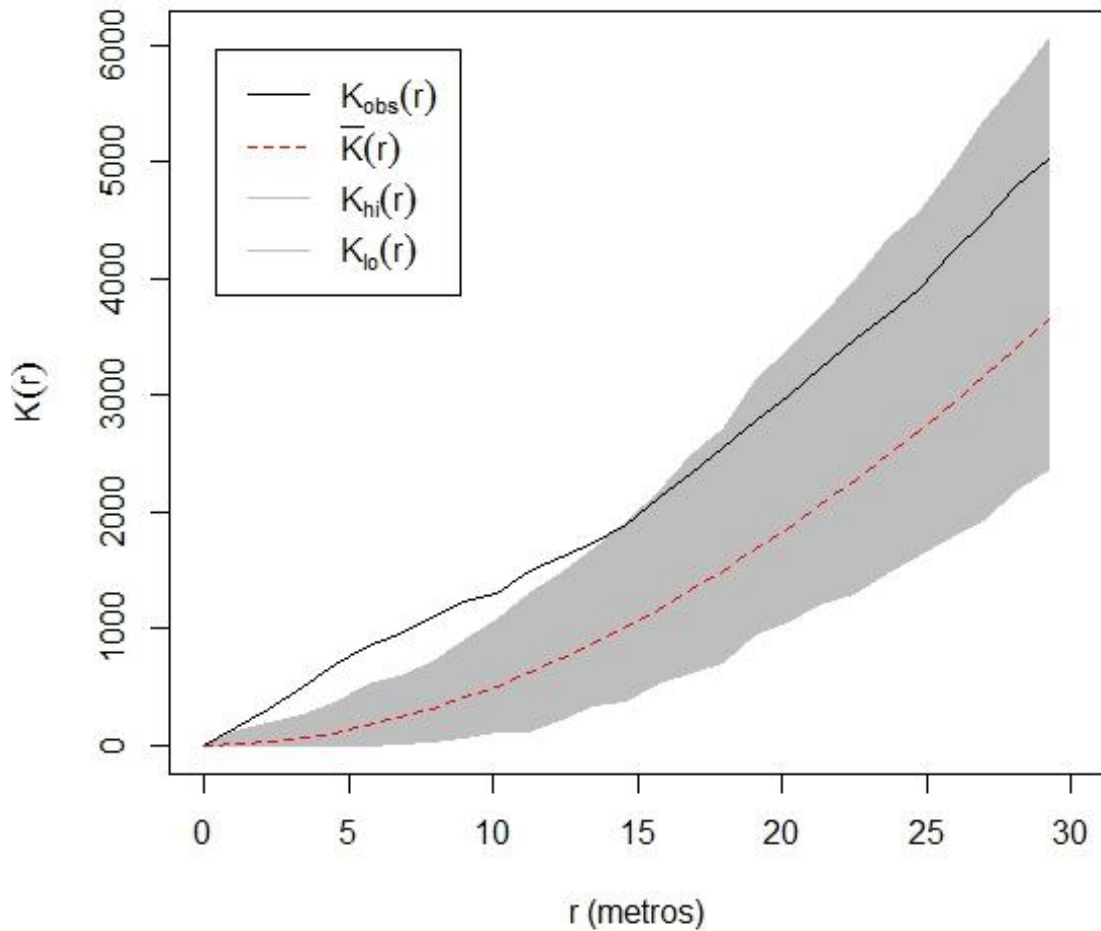


Figura 3: Análisis de Montecarlo para la función K de Ripley. Línea continua: patrón observado de distribución espacial de individuos de regeneración. En gris: intervalo de confianza generado con 10.000 simulaciones realizadas por el modelo inhomogéneo de Poisson seleccionado. Línea roja discontinua: media de las simulaciones.

Identificación de sitios al interior de la ex Hacienda Siete Hermanas que presenten condiciones favorables para la regeneración natural de *Jubaea chilensis*.

Debido al bajo poder predictivo del modelo en cuanto a la densidad de regeneración, el modelo no podría ser utilizado para cuantificar la densidad esperada de regeneración en la ex Hacienda Siete Hermanas. Sin embargo, el modelo tiene buenos resultados en la predicción de la presencia de individuos de regeneración (70% aciertos). La predicción del modelo en la ex Hacienda Siete Hermanas, sugiere que sólo en un 25% del área analizada existe un mayor potencial para la regeneración natural de *Jubaea chilensis*. En la Figura 4 se observan los sitios con un mayor potencial para la regeneración natural de la especie en la ex Hacienda Siete Hermanas, lugares donde se conjugan las variables encontradas como significativas mediante la modelación. Los sitios seleccionados se encuentran circunscritos a la vecindad de los individuos adultos.

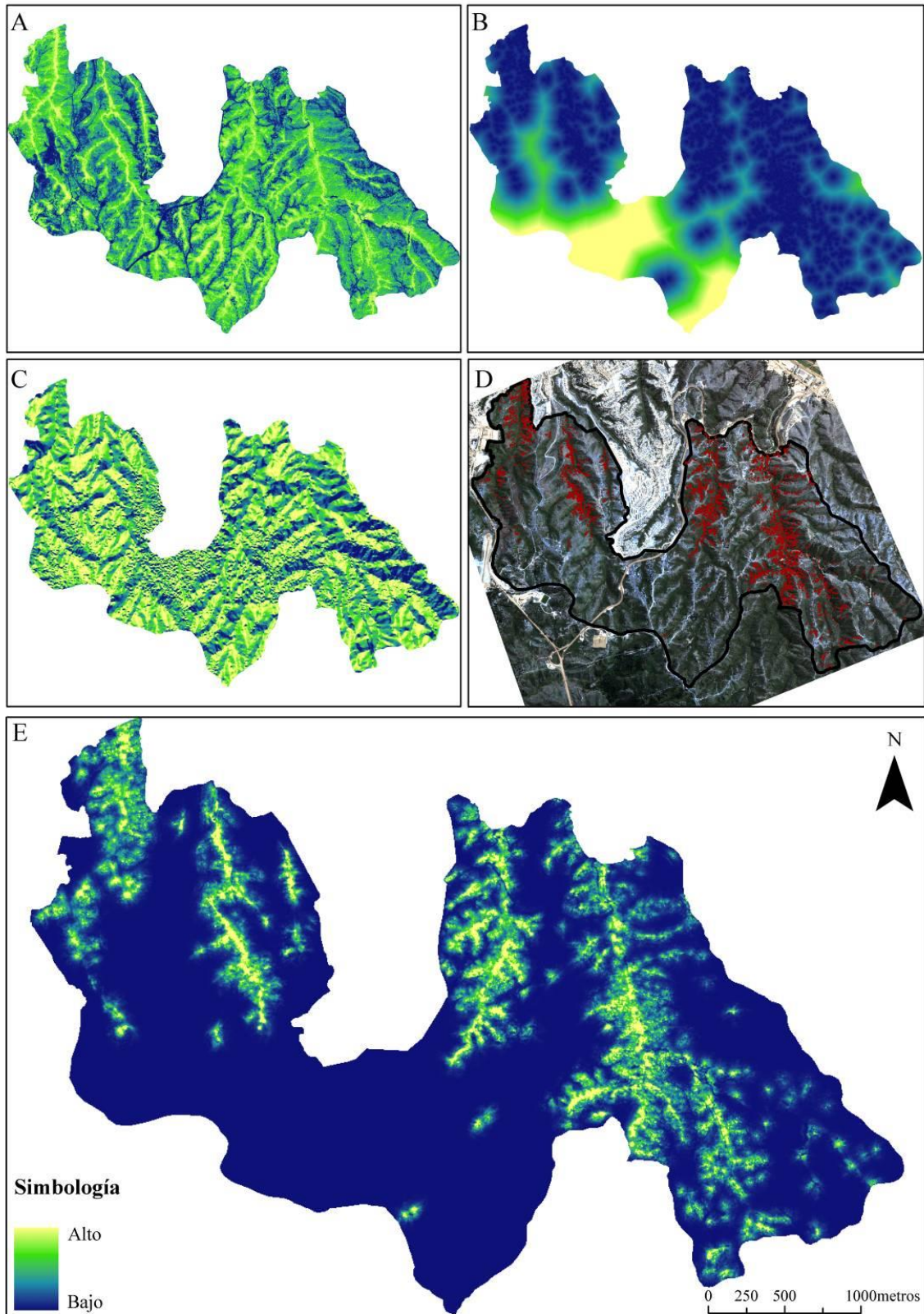


Figura 4: Variables y predicción del modelo seleccionado en el sector de la ex Hacienda Siete Hermanas. A) Índice normalizado de vegetación, B) distancia a individuos adultos, C) variable northing, valores mayores representan zonas de exposición norte y valores bajos zonas de exposición sur, D) distribución espacial de individuos adultos y E) predicción del modelo seleccionado, el cual integra las variables descritas.

Discusión

La derivación de procesos ecológicos desde la observación de patrones espaciales es usual en ecología. Sin embargo, es necesario tener ciertas precauciones en la interpretación de los datos. El patrón espacial observado en un determinado tiempo es el reflejo de una serie de procesos ocurridos a diferentes escalas espaciales y temporales, donde incluso diferentes procesos podrían crear el mismo patrón espacial (Cale et al., 1989). En estudios de campo no manipulativos, la incertidumbre es mayor, ya que no se tiene control sobre todas las variables que puedan influir, impidiendo aislar todos los factores. En comunidades sometidas a presiones antrópicas, la inferencia de procesos ecológicos a raíz de los patrones espaciales tiene aun más incertidumbre ya que se desconoce si el patrón observado es reflejo de procesos naturales como la dispersión y depredación de semillas, germinación, competencia y reclutamiento, o a perturbaciones antrópicas que podrían interferir de diferentes formas en la dinámica natural. El reclutamiento es el reflejo de los individuos que lograron soslayar las diferentes barreras demográficas, lográndose desarrollar un nuevo individuo. En este estudio, si bien el muestreo fue realizado al interior de un área silvestre protegida, es posible los patrones observados sean reflejo también de las presiones antrópicas a las cuales se encuentra sometida el área. Independiente de esto, el patrón de reclutamiento nos muestra a los individuos que lograron soslayar los distintos filtros naturales o artificiales. Lo que cobra mucho valor asumiendo que gran parte de las poblaciones de *J. chilensis* se encuentra bajo fuerte presión antrópica.

Interacción espacial de individuos de regeneración y adultos de Jubaea chilensis.

Una de las principales limitaciones del análisis de K de Ripley, es que asume una densidad homogénea al interior del área analizada (Law et al., 2009). Esto puede ser especialmente limitante en ambientes muy heterogéneos (Gómez-Aparicio, 2008), o cuando se analiza el patrón espacial de especies con alta especialización en su nicho de regeneración (Plotkin et al., 2000). En especies muy exigentes, se podrían encontrar grandes áreas con cero individuos, y otros sitios con altas densidades en donde se conjuguen las variables condicionantes para su establecimiento. Esto puede generar agrupamientos virtuales, dependientes de la variabilidad ambiental más que de la interacción entre los individuos.

En la regeneración de *J. chilensis* se observa un patrón de distribución espacial que difiere significativamente de la aleatoriedad (Figura 3). Se observa un patrón agrupado para todos los rangos de distancia analizado, esperable para individuos de regeneración y confirmando la hipótesis planteada inicialmente (Maltez-Mouro et al., 2007). Los patrones espaciales agrupados de regeneración pueden deberse a procesos endógenos (e.g. dispersión de semillas), o a procesos exógenos, en donde la regeneración responda a otros factores que se producen de manera agrupada (e.g. depresiones en el terreno, parches de bosque) (Austin, 2002). Las parcelas analizadas son altamente heterogéneas, específicamente en cuanto a la cobertura vegetal, característica distintiva del bosque esclerófilo acompañante de *J. chilensis*, donde se puede observar un mosaico de zonas con alta cobertura vegetal y suelos desnudos (Fuentes et al., 1984). Por otro lado, debido al mecanismo de dispersión de semillas de *J. chilensis*, se puede inferir grandes concentraciones de semillas a cortas distancias del árbol semillero. Ambos

factores pueden estar dando cuenta del patrón agrupado de distribución, especialmente por la alta dependencia de las plántulas de *J. chilensis* por un sotobosque que las protegeja (González et al., 2009; Cabello, 2006; Marcelo et al., 2006; Michae, 1992). Esto sugiere la generación de núcleos de regeneración de *J. chilensis* debido a la conjugación de condiciones ambientales propicias para el establecimiento de nuevos individuos. Este patrón puede a su vez sugerir la concentración de individuos de regeneración en zonas donde las plántulas logren escapar a la depredación de semillas y a la herbivoría (bajo la cobertura de arbustos). Ésta última principal factor de mortalidad en las primeras etapas de desarrollo de las plántulas (Marcelo et al., 2006). La distribución agregada de los individuos de regeneración, sugiere que no habrían desventajas asociadas a competencia intraespecífica en *J. chilensis*, o que esta sería relativamente débil en las primeras etapas de desarrollo. No obstante, como es esperable en estadios de desarrollo más avanzados, se evidencia una distribución más regular de los individuos adultos a corta distancia (Figura 3).

El agrupamiento de individuos de regeneración, se produciría principalmente a cortas distancias de la planta madre (Figura 4). Sin embargo, a una distancia discordante con lo esperado por su mecanismo de dispersión de semillas. Es esperable el reclutamiento ocurra a cortas distancias, por un mecanismo de facilitación cercano a la planta madre debido al aumento de humedad y al cumplimiento de los requerimientos de sitio de la especie. Este agrupamiento se puede ver acentuado en especies con frutos de gran tamaño, donde la dispersión de sus semillas es esperable sea a cortas distancias (Cousens et al., 2008). En otras palmas con mismo mecanismo de dispersión en ecosistemas semi-áridos se ha encontrado una mayor densidad de plántulas cercano a la planta madre (Barot et al., 1999; Wehncke et al., 2009). En *J. chilensis*, si bien el *peak* de densidad de plántulas ocurre cercano a la planta madre, éste difiere del patrón predecible por el mecanismo de dispersión de semillas, en donde la mayor concentración de semillas ocurriría con una mayor densidad desde la planta madre, disminuyendo con la distancia. En este caso, se observa que la mayor densidad ocurre en un rango de distancia entre los 5 y 7 m desde el adulto más cercano. Si bien, por la naturaleza del análisis no se puede conocer la procedencia de los individuos de regeneración, es esperable que la mayor densidad se concentre bajo la copa de árboles reproductivos, decreciendo desde los mismos (Cousens et al., 2008; Barot et al., 2009). El patrón observado sugiere que el reclutamiento en *J. chilensis* sigue más bien el mecanismo planteado por Janzen–Connell (1970), donde el mayor reclutamiento ocurre a distancias intermedias desde la planta madre. Se produciría un punto de equilibrio (máxima densidad de regeneración) entre la curva de dispersión de semillas (decreciente desde la planta madre) y la probabilidad de supervivencia (creciente desde la planta madre), producido esto último por mecanismos densodependientes de depredación de semillas y plántulas, y competencia intraespecífica (mayor mortalidad en sitios más densos) (Hamill y Wright, 1986; Palik et al., 2003).

Se observa un patrón discordante entre la lluvia de semillas esperada y el reclutamiento, proceso similar al observado en *Araucaria araucana* (semilla gran tamaño y dispersión por gravedad), el cual es modelado principalmente por las altas tasas de depredación de semillas a cortas distancia de la planta madre (Sanguinetti y Kitzberger, 2009). Al igual que en *A. araucana*, el patrón espacial de reclutamiento en *J. chilensis* podría ser reflejo de la depredación de semillas por parte de *Octodon degus* que compone su dieta principalmente de semillas de *J. chilensis* (Michae, 1992; Yates et al., 1994). Esto, sería concordante con la relación negativa entre la presencia de *Octodon degus* e individuos

de regeneración hallados en un rodal al interior del Parque Nacional La Campana (Aguirre, 2011). Sin embargo, la extracción comercial de semillas de *J. chilensis*, hace suponer un mecanismo conjunto de depredación cercano a los árboles semilleros, además de alta mortalidad por pisoteo en las faenas de extracción en zonas con mayor densidad de semillas (Michae, 1992).

J. chilensis tiene una alta capacidad germinativa cercana al 70%. Sin embargo, ésta tendría una latencia profunda, ya que este porcentaje es alcanzado a los 21 meses (Cabello, 2006), dejando expuestas las semillas a la depredación por un largo periodo de tiempo en el campo. Debido a esto, es posible que un número reducido de semillas logren escapar a este efecto conjunto de depredación bajo la copa de *J. chilensis*. La sobreexplotación de semillas, además de modelar la estructura poblacional de *J. chilensis* (Gonzalez et al., 2009), podría estar modelando a su vez la estructura espacial de la población.

Condiciones ambientales relacionadas con la regeneración natural de Jubaea chilensis.

El modelo homogéneo de Poisson muestra los parámetros más bajos de evaluación, lo que confirma la importancia de las condiciones ambiental en la distribución espacial de la regeneración de *J. chilensis*. La mayor probabilidad de reclutamiento se encontró cercana a los individuos adultos, especialmente bajo la cobertura de la vegetación acompañante. El efecto nodriza ha sido ampliamente reportado en comunidades de plantas mediterráneas (Gómez-Aparicio et al., 2004), al igual que en los bosque esclerófilos de la zona central de Chile (Fuentes et al., 1984; Holmgren et al., 2000; Newton y Tejedor, 2011; Fuentes-Castillo et al 2012). Disminución de la temperatura y aumento de la humedad podrían ser esencial en la supervivencia de las plántulas en ecosistemas mediterráneos, debido a la prolongada sequía de verano (Gómez-Aparicio et al., 2004). Se ha observado a su vez el aumento de nutrientes (Holmgren et al., 1997), e incluso protección contra herbívoros (Baraza et al., 2006). En *J. chilensis* se ha encontrado un efecto positivo de árboles y arbustos acompañantes independiente la especie. Sólo se encontró que las plántulas bajo *Acacia caven* y *Retanilla trinervis* fueron depredadas antes que las ubicadas bajo otras especies, lo que podría ser explicado por un mecanismo de protección de micromamíferos bajo el dosel espinoso, aumentando así la herbivoría (Marcelo et al., 2006). Este efecto facilitador de la cobertura en la supervivencia de *J. chilensis* se debería principalmente a un menor pérdida de agua por transpiración, debido a la menor temperatura en la sombra bajo el dosel (Marcelo et al., 2006). La relación encontrada mediante la modelación entre cobertura vegetal y densidad de regeneración, coincide con lo encontrado por Aguirre (2011) en el Parque Nacional La Campana. Por otro lado, la relación positiva significativa entre la densidad de reclutamiento y la exposición (mayor densidad en exposición norte) es también coincidente con lo reportado por Aguirre (2011). Posible mecanismo que explique esta relación puede ser la mayor producción de semillas que tendrían los individuos adultos expuestos a la radiación solar, inhibiéndose en lugares muy sombríos y húmedos, al igual que en rodales muy densos (Cabello, 2006).

Al igual que Díaz (2009) no se encontró una relación entre la densidad de regeneración y la densidad de individuos adultos. Debido probablemente a que los mecanismos de limitación de regeneración serían principalmente exógenos.

Modelación de la densidad de regeneración

El modelo seleccionado no obtuvo buenos resultados en la predicción de la densidad de regeneración, explicando sólo un 20% de la varianza. Sin embargo acertó en la presencia/ausencia de individuos de regeneración (~70%). La densidad de regeneración natural se encuentra en gran medida modelada por la depredación de semillas (humanos y roedores) y la herbivoría (Marcelo et al., 2006), lo que puede resultar difícil de predecir teniendo en cuenta la poca regulación sobre la extracción de semillas y el nicho ecológico poco restrictivo de *Oryctolagus cuniculus* (principal responsable de la mortalidad de plántulas) (Simonetti, 1989). En las parcelas muestreadas se encontró alta variabilidad en el reclutamiento (0-22 individuos/ha), aun cuando se presentaban condiciones ambientales muy similares. Díaz (2009) encontró que una gran proporción de plántulas en el Parque Nacional La Campana se encontraban sólo en una de las microcuencas prospectadas, habiendo déficit de regeneración en las demás. Esta alta variabilidad en el reclutamiento puede dar cuenta a su vez de la baja capacidad predictiva del modelo seleccionado.

El modelo subestima en un 30% la densidad de regeneración hallada en el Parque Nacional La Campana. Esto puede deberse al bajo poder predictivo que tiene el modelo en la interacción espacial entre los individuos de regeneración, donde en los primeros metros subestima la densidad. El modelo no es capaz de reflejar el agrupamiento de la regeneración. La variabilidad explicada por el modelo puede estar determinada por el tipo de modelo utilizado, en donde no se incluyó la interacción entre los individuos de regeneración como variable.

Identificación de sitios favorables para la regeneración de *Jubaea chilensis* en la ex Hacienda Siete Hermanas.

La identificación de variables ambientales para la identificación de sitios favorables para la regeneración encontrados en este estudio, es concordante con lo expuesto por otros autores (Michae, 1992; Marcelo et al., 2006). Concentrándose la mayor densidad de individuos bajo la cobertura vegetal, en un mecanismo conjunto de escape a la depredación de semillas y efecto nodriza.

El modelo predicho en la ex Hacienda Siete Hermanas seleccionó sitios en la vecindad de los individuos adultos, con las mayores valores hasta aproximadamente 30 m de distancia. Restringió a su vez la regeneración a zonas con altos valores de NDVI, dando cuenta del efecto nodriza encontrado en campo por Marcelo et al (2006) y en este estudio. Asumiendo el efecto positivo de la exposición a la radiación solar sobre la producción de semillas (Rubinstein, 1969), el modelo también predice una mayor regeneración natural en donde los árboles se encuentran mayormente expuestos a la radiación solar.

El Parque Nacional La Campana y la ex Hacienda las Siete Hermanas difieren en su composición florística. En el Parque, *J. chilensis* se asocia en zonas xéricas con *Acacia caven*, *Puya sp.* y *Echinopsis chiloensis* (Quisco), en ambientes méxicos con *Quillaja saponaria* y *Lithraea caustica*, y *Cryptocarya alba* y *Peumus boldus* en los fondos de quebrada (Elortegui y Moreira, 2002). En la ex Hacienda de Siete Hermanas se encuentra asociada también con especies del bosque esclerófilo como *Cryptocarya alba* y *Peumus boldus*, pero también con especies como *Chusquea cuminguii* y *Retanilla*

trinervia en zonas continuamente afectadas por incendios forestales (Aguirre, 2011). En el parque Nacional La Campana, se ha observado que diferentes especies pueden actuar indistintamente como nodrizas de la regeneración de *J. chilensis* (Marcelo et al 2006; Aguirre 2011). Sin embargo, en el sector de la ex Hacienda de Siete Hermanas se ha observado una inhibición de la regeneración bajo *Chusquea cumingui* y *Retanilla trinervia* (Aguirre, 2011).

El NDVI representa la actividad fotosintética de las plantas, por lo que distintas composiciones de especies podrían obtener mismos valores de NDVI. Es por esto, que el modelo no lograría discriminar entre diferentes especies puedan facilitar o inhibir la regeneración (no era objetivo de este trabajo), por lo que se podrían estar seleccionando sitios no adecuados para la regeneración natural de *J. chilensis*, como por ejemplo sitios dominados principalmente por *Chusquea cumingui*.

CONCLUSIONES

El establecimiento de *J. chilensis* ocurre de manera agrupada, por lo que se comprueba la hipótesis planteada inicialmente. Este agrupamiento es esperable debido a la dispersión de semillas y la especialización del nicho en *J. chilensis*. Estos núcleos de regeneración ocurren de acuerdo a los mecanismos propuestos por Janzen-Connell (1970). El establecimiento se maximiza a una distancia de los individuos adultos en la cual logran escapar de las zonas de mayor densidad de semillas a menores distancias, sometidas a fuerte depredación. Debido a esto, no se comprueba la hipótesis planteada inicialmente. El patrón observado sugiere una discordancia entre la lluvia de semillas y el reclutamiento de la especie, por lo que la dispersión efectiva ocurriría limitado por su coincidencia con el nicho de regeneración bajo la cobertura vegetal. La estructura espacial de la regeneración podría estar modelada por la fuerte presión extractiva que existe sobre las semillas.

Este trabajo confirma la facilitación de *J. chilensis* por la vegetación acompañante en su ciclo reproductivo. Por lo cual, la restauración de la especie debe necesariamente considerar el reestablecimiento de elementos del bosque esclerófilo.

La modelación de la densidad de regeneración natural de *J. chilensis* no permitió cuantificar su densidad en el Parque Nacional La Campana de manera precisa. Esto no permitiría su utilización en la estimación de la regeneración. Futuros trabajos deberían abordar el problema con el ajuste de modelos agrupados de Poisson (Apéndice 3), u otros que den cuenta del agrupamiento de los individuos. Por otro lado, la selección de variables logra dar cuenta de sitios en donde se puede esperar una mayor probabilidad de establecimiento. Es necesario ser cauteloso con la extrapolación en la ex Hacienda de Las Siete Hermanas, ya que si bien es esperable una mayor densidad de semillas en zonas cercanas a los individuos adultos, la interacción planta-planta en el sitio podría limitar la regeneración natural si se utilizara sólo el NDVI como criterio de selección de sitios para un eventual plan de restauración, por la posible selección de zonas que inhiban la regeneración natural (bajo *Chusquea cumingui* y *Retanilla trinervia*). Sin embargo, el modelo logra acotar de manera eficiente las zonas con mayor probabilidad de reclutamiento. La predicción del modelo podría eventualmente ser utilizada para la preselección de sitios, asegurándose en terreno de tener una composición de especies acompañantes adecuadas para la regeneración de la especie.

BILIOGRAFÍA

Aguirre F. 2011. Ecological parameters related to the regeneration of Chilean palm forests (*Jubaea chilensis* (Mol.) Baillon) in the Region of Valparaíso - Chile. The Rufford Small Grants Foundation Final Report. Disponible en: http://www.ruffordsmallgrants.org/rsg/projects/francisco_aguirre_saavedra. Consultado el 7 de Septiembre de 2012.

Akaike H. 1973. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In Petrov BN, G Czaki eds. Second International Symposium on Information Theory. Budapest, Hungary. Akademiai Kiadó. p. 267-281

Austin, M.P., 2002. Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling. *Ecological Modeling*. 157, 101–118.

Baddeley, A. 2008. Analysing spatial point patterns in R, Workshop Notes. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO). Disponible en: <http://www.csiro.au/resources/Spatial-Point-Patterns-in-R.html>, leído en Noviembre del 20011.

Baddeley, A.J. y Turner, R. 2000. Practical maximum pseudo-likelihood for spatial point pattern (with discussion). *Australian and New Zealand Journal of Statistics*. 42, 283-322.

Baddeley, A. y R. Turner. 2005. spatstat: an R package for analyzing spatial point patterns. *Journal of Statistical Software*, 12(6):1-42.

Baddeley, A. y Turner, R. 2006. Modelling Spatial Point Patterns in R. En: A. Baddeley, P. Gregori, J. Mateu, R. Stoica & D. Stoyan (eds.). *Case Studies in Spatial Point Process Modelling*, pp. 23-74. Springer. Heidelberg. Alemania.

Baddeley, A. y R. Turner. 2012. Package ‘spatstat’. Version 1.28-1: Disponible en <http://www.spatstat.org/spatstat/current/spatstatManual.pdf>. Leído el 15 Agosto 2012.

Barot, S., Gignoux, J., Menaut, J.C., 1999. Demography of a savanna palm tree: predictions from comprehensive spatial pattern analysis. *Ecology* 80,1987-2005.

Baraza, E., Zamora, R., Hódar, J.A., 2006. Conditional outcomes in plant–herbivore interactions: neighbours matters. *Oikos* 113, 148–156.

Besag, J., 1977. Contribution to the discussion of Dr. Ripley’s paper. *Journal of the Royal Statistical Society* 39 (2): 193–195.

Beven, K.J., Kirkby, M.J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Journal*. 24, 43–69.

Cabello A. 2006. *Jubaea chilensis* (Mol.) Baillon. En: Donoso, C. (Ed.). *Las Especies arbóreas de los Bosques Templados de Chile y Argentina*. Autoecología. Marisa Cúneo Ediciones, Valdivia, Chile. 678 p.

Cale, W. G., G. M. Henebry, y J. A. Yeakly. 1989. Inferring process from pattern in natural communities. *BioScience* 39:600–606.

CATHALAC (Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y El Caribe) 2009. Manual Curso: Modelación de la contaminación por fuentes difusas y dinámica de sedimentos aplicando SIG. San Juan, Puerto Rico. Disponible en <http://www.cathalac.org/education>.

Clark, J.S., Beckage, B., Camill, P., Cleveland, B., Hille Ris Lambers, J., Lichter, J., Mclachlan, J., Mohan, J. & Wyckoff, P.1999. Interpreting recruitment limitation in forests. *American Journal of Botany*, 86, 1–16.

CONAMA, 2005. Ficha Web Oficial de Clasificación *Jubaea chilensis*. Disponible en: http://www.conama.cl/clasificacionespecies/Anexo_tercer_proceso/Jubaea_chilensis.doc. Leído el 8 de octubre del 2012.

CONAMA. 2008. Resolución de Clasificación de Especies. Disponible en <http://especies.mma.gob.cl>. Leído el 8 de octubre 2012.

Cousens, R., C. Dytham, y R. Law. 2008. *Dispersal in Plants*. 221p.

Del Pozo A., E., Fuentes, E Hajek y J Molina. 1989. Zonación microclimática por efecto de los manchones de arbustos en el matorral de Chile central. *Revista Chilena de Historia Natural* 62:85-94.

De la Cruz Rot, M. 2006. Introducción al análisis de datos mapeados o algunas de las (muchas) cosas que puedo hacer si tengo coordenadas, *Ecosistemas* 15(3): 19–23.

De la Cruz Rot, M. 2008. Métodos de analizar datos puntuales. EN: Maestre, F.T, Escudero, A. y Bonet, A. eds. *Introducción al análisis espacial de datos en ecología y ciencias ambientales: métodos y aplicaciones*. URJC-AEET-CAM.

Díaz EM. 2009. Estructura de poblaciones naturales de palma chilena, *Jubaea chilensis* (Mol.) Baillon. Tesis de grado, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile. 50 pp.

Diggle PJ. 2003. *Statistical analysis of point patterns*, 2nd edn. London, UK: Arnold.

Dixon, P. 2001. Ripley's K function. Department of Statics, Iowa State University.

Elórtegui, F. S. y M. A. Moreira. 2002. Parque Nacional La Campana: Origen de una Reserva de la Biosfera en Chile Central. Taller La Era, Santiago, Chile.

ERDAS, Inc. 2002. *IMAGINE OrthoBase Pro User's Guide ERDAS IMAGINE Version 8.6* (Erdas, Inc., Atlanta, GA).

FAO. 1997. *State of the World's Forests*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

FAO. 2012. El estado de los bosques del mundo. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/016/i3010s/i3010s.pdf>. Leído el 8 de septiembre de 2012.

Fernández I, N Morales, L Olivares, J Salvatierra, M Gómez y G Montenegro. 2009. Restauración ecológica para ecosistemas vegetales nativos afectados por incendios forestales. CONAF.

Fischer J. y D.B. Lindenmayer. 2007. Landscape modification and habitat fragmentation: a synthesis. *Global Ecology and Biogeography*, 16:265-280.

Flores, A. y Aguirre, F., 2008. Riqueza florística del santuario de la naturaleza Palmar El Salto, Viña del Mar, Región de Valparaíso, Chile. *Gayana Botanica*.65(1):71-83.

Fortin, M.J. y Dale, M.R.T. 2005. *Spatial analysis: a guide for ecologists*. Cambridge University Press, Cambridge.

Fuentes ER y E Hajek. 1979. Patterns of landscape modifications in relation to agricultural practice in central Chile. *Environmental Conservation* 6:265-271.

Fuentes, E.R., Otaiza, R.D., Alliende, M.C., Hoffmann, A.J., Poiani, A., 1984. Shrub clumps of the Chilean matorral vegetation: structure and possible maintenance mechanisms. *Oecologia* 62, 405–411.

Fuentes-Castillo, T., Miranda, A., Rivera-Hutinel, A., Smith-Ramírez, C., Holmgren, M., 2012. Nucleated regeneration of semiarid sclerophyllous forests close to remnant vegetation. *Forest Ecology and Management* 274, 38–47.

Gajardo R. 1994. *La vegetación natural de Chile. Clasificación y distribución geográfica*. Editorial Universitaria. Santiago, Chile.

Gómez-Aparicio, L., Zamora, R., Gómez, J.M., Hódar, J.A., Castro, J., Baraza, E., 2004. Applying plant facilitation to forest restoration in Mediterranean ecosystems: a meta-analysis of the use of shrubs as nurse plants. *Ecological Application* 14, 1128–1138.

Gómez-Aparicio L .2008. Spatial patterns of recruitment in Mediterranean plant species: linking the fate of seeds, seedlings and saplings in heterogeneous landscapes at different scales. *Journal of Ecology* 96, 1128–1140.

González L.A. & Vita A. 1987. Palma: uso, regeneración y tratamientos. *Revista del Campo* 11(569): 14-15.

González, L., M. Toral & R. Garfias. 2001. Estudios de poblaciones de palma chilena: avanzado estado de deterioro. *Chile Forestal* 284: 53- 56.

González L. A., Bustamante R., Navarro C., Rafael M., Herrera M., M. A. Toral Ibáñez, Manuel. 2009. The Ecology and management of the Chilean palm. (*Jubaea chilensis* (Mol) Baillon): History, current situation and perspectives. *PALMS* 53(2).

- Grubb, P.J. 1977. The maintenance of species-richness in plant communities: the importance of the regeneration niche. *Biological Review* 52: 107-145.
- Hamill, D. y S. J. Wright. 1986. Testing the dispersion of juveniles relative to adults: a new analytic method. *Ecology* 67: 952-957.
- Hechenleitner, P., M. Gardner, P. Thomas, C. Echeverría, B. Escobar, P. Brownless & C. Martínez. 2005. Plantas amenazadas del centro sur de Chile. Distribución, conservación y propagación. Universidad Austral de Chile y Real Jardín Botánico de Edimburgo. 188 pp.
- Holmgren, M., Scheffer, M., Huston, M.A., 1997. The interplay of facilitation and competition in plant communities. *Ecology* 78, 1966–1975.
- Holmgren, M., Segura, A.M., Fuentes, E.R., 2000. Limiting mechanisms in the regeneration of the Chilean matorral: experiments on seedling establishment in burned and cleared mesic sites. *Plant Ecology* 147, 49–57.
- Holmgren M. 2002. Exotic herbivores as drivers of plant invasion and switch to ecosystem alternative states. *Biological Invasions* 4:25–33.
- Janzen, D. H. 1970. Herbivores and the Number of Tree Species in Tropical Forests. *American Naturalist*. 104(940): 501-527
- Jordano, P. y Herrera, C.M. 1995. Shuffling the offspring: Uncoupling and spatial discordance of multiple stages in vertebrate seed dispersal. *Écoscience* 2: 465-492.
- Jordano, P., Pulido, P., Arroyo J., García-Castaño J.L., y García-Fayos P. 2004. Procesos de limitación demográfica. Pp 229-248. En: F. Valladares (ed.) *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Krause, K. 2003. Radiance conversion of Quickbird data – Technical note. DigitalGlobe Inc., Longmont, Colorado, USA.
- Law, R., J. Illian, D.F.R.P. Burslem, G. Gratzler, C.V.S. Gunatilleke, and I. a. U.N.Gunatilleke. 2009. Ecological information from spatial patterns of plants: insights from point process theory. *Journal of Ecology* 97(4): 616-628.
- Lillesand T, R Kiefer, J Chipman. 2008. Remote sensing and image interpretation. New York, USA. John Wiley & Sons, Sixth edition. 756 p.
- Lotwick, H.W., Silverman, B.W., 1982. Methods for analysing spatial processes of several types of points. *Journal of the Royal Statistical Society* 44 (3), 406–413.
- Luebert, F. y P. Pliscoff. 2005. Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Editorial Universitaria, Santiago.
- Marcelo W., Bustamante R. y R. Vásquez. 2006. Efectos de la herbivoría, el microhábitat y el tamaño de las semillas en la sobrevivencia y crecimiento de plántulas de la palma chilena. *Revista Ambiente y Desarrollo* 22(2): 55 – 62.

- Maltez-Mouro S, García LV, Marañón T, Freitas H. 2007. Recruitment patterns in a Mediterranean oak forest: a case study showing the importance of the spatial component. *Forest Science* 53:645–652
- Michea, G. 1992. Antecedentes técnicos y caracterización de los principales Palmares de la V región. Informe Técnico, CONAF, 22 p.
- Møller J, A.R. Syversveen, and R.P. Waagepetersen, 1997. Log Gaussian Cox processes: A statistical model for analyzing stand structural heterogeneity in forestry. In H. Kure et al., editor, *Proc. First European Conference for Information Technology in Agriculture*. Department of Mathematics and Physics, The Royal Veterinary and Agricultural University, Denmark, 1997.
- Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, da Fonseca GAB, Kent J. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403: 853–858.
- Nathan, R. y H. Muller-Landau. 2000. Spatial patterns of seed dispersal, their determinants and consequences for recruitment. *Trends in ecology & evolution* 15(7): 278-285.
- Newton, A.C. y Tejedor, N. (Eds.) (2011). *Principios y práctica de la restauración del paisaje forestal: Estudios de caso en las zonas secas de América Latina*. Gland, Suiza: UICN y Madrid, España: Fundación Internacional para la Restauración de Ecosistemas. xxiv + 409 pp.
- O'Loughlin, E.M., 1981. Saturation regions in catchments and their relations to soil and topographic properties. *Journal of Hydrology*. 53, 229–246.
- Palik, B.; Mitchell, R.J.; Pecot, S.; Battaglia, M.; Pu, M. 2003. Spatial distribution of overstory retention influences resources and growth of longleaf pine seedlings. *Ecological Application* 13, 674–686.
- Pelissier, R. y Goreaud, F. 2001. A practical approach to the study of spatial structure in simple cases of heterogeneous vegetation. *Journal of Vegetation Science* 12: 99-108.
- Penttinen, A. y Stoyan, D. 2000. Recent Applications of Point Process Methods in Forestry Statistics. In *Statistical Science*. Vol 15(1) : 61-78.
- Pitman, N. C. A., y Jørgensen, P. M. 2002. Estimating the size of the world's threatened flora. *Science* 298(5595):989.
- Plissock, P. 2002. Climatología de la Campana. p 22-26. En Elortegui S. y A. Moreira (eds.). *Parque Nacional la Campana, origen de una reserva de la biosfera en Chile central*. Taller La Era, Santiago, Chile.
- Plotkin JB, Potts MD, Leslie N, Manokaran N, LaFrankie J y Ashton P.S. 2000. Species-area curves, spatial aggregation, and habitat specialization in tropical forests. *Journal of Theoretical Biology* 207: 81-99.

- Ripley, B.D., 1981. *Spatial Statistics*. John Wiley & Sons, 252 pp
- Ripley BD. 1988. *Statistical inference for spatial processes*. Cambridge University Pres, Cambridge
- Rozas V. y J.J. Camarero. 2005. Técnicas de análisis espacial de patrones de puntos aplicadas en ecología forestal. *Investigación agraria: Sistemas y recursos forestales* 14(1), 79-97.
- Rubinstein, A. 1969. *Inventario y estudio de producción de un rodal de palma chilena, Jubaea chilensis (Mol.) Baillón, Hacienda Ocoa, Provincia de Valparaíso* Tesis Ing. For. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Agronomía. 81 pp.
- Salas, C., LeMay, V., Núñez, P., Pacheco, P., and Espinosa, A. 2006. Spatial patterns in an old-growth *Nothofagus obliqua* forest in south-central Chile. *Forest Ecology and Management* 231(1-3): 38-46.
- Sanguinetti, J., and T. Kitzberger. 2009. *Araucaria araucana* temporal and spatial seedling establishment patterns: masting, seed predation and understory vegetation effects. *Revista Chilena de Historia Natural* 82: 319-335
- Schulz, J., Cayuela, L., Echeverría, C., Salas, J., Rey Benayas, J. M. 2010. Monitoring land cover change of the dryland forest landscape of Central Chile (1975-2008). *Applied Geography* 30: 436-447.
- Serra, M. T., R. Gajardo y A. Cabello. 1986, *Ficha Técnica de Especies Amenazadas, Jubaea chilensis (Mol.) Baillon, "Palma Chilena" (Palmaceae), Especie Vulnerable*. Programa de Protección y Recuperación de la Flora Nativa de Chile. Corporación Nacional Forestal, Depto. de Áreas Silvestres Protegidas/Universidad de Chile, Fac. Cs. Agrarias y Forestales. 26p.
- Simonetti J.A. 1989. Microhabitat use by *Oryctolagus cuniculus* in central Chile: a reassessment. *Mammalia* 3: 363-368.
- Penttinen A. y D., Stoyan. 2000. Recent applications of point process methods in forestry statistics. *Statistical Science* 15, 1, 61-78.
- Waagepetersen, R. P. (2007). An estimating function approach to inference for inhomogeneous Neyman-Scott processes. *Biometrics* 63, 252–8.
- Waller, L.; Smith, D. L.; Childs, J. E.; Real, Leslie A. 2003. Monte Carlo assessments of goodness-of-fit for ecological simulation models. *Ecological Modelling*. Vol: 164. Pages 49-63.
- Wehncke, E. V., X. López-Medellín and E. Ezcurra. 2009. Blue fan palm distribution and seed removal patterns in three desert oases of northern Baja California, Mexico. *Plant Ecology* 208:1-20.
- Wiegand, T. y Moloney, K. A. 2004. Rings, circles, and null-models for point pattern analysis in ecology. *Oikos* 104: 209-229.

Wilson, J.P., Gallant, J.C., 2000. Secondary topographic attributes. En: Wilson, J.P., Gallant, J.C. (Eds.), *Terrain Analysis: Principles and Applications*. John Wiley and Sons, New York, pp. 87–131.

Yates L.R., F., Saiz y S., Zunino. 1994. *Octodon degus*: valor nutricional y preferencia del recurso trófico en el Palmar de Ocoa, Parque Nacional La Campana, Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*. 67: 89-99.

APÉNDICES

Apéndice 1: Análisis univariante y bivalente de procesos puntuales

El análisis de patrones puntuales consiste en poner a prueba la hipótesis de que los datos tienen una distribución aleatoria, con lo que se podría asumir que no existe interacción inter o intra específica que determine la distribución espacial de los individuos. La hipótesis nula es dependiente del proceso analizado. En el análisis de patrones univariantes (e.g. individuos adultos de una misma especie) la hipótesis nula correspondería a que estos se distribuyen aleatoriamente en el espacio, es decir que cada uno de los puntos del patrón se va agregando independientemente de donde estén ubicado los demás. En cambio, en el análisis de patrones puntuales bivariantes, se determina la interacción entre dos patrones de puntos diferentes, o la interacción de los puntos de un mismo patrón pero con características distintivas (e.g. estados de desarrollo: plántulas en función de los adultos). En este caso, la hipótesis nula corresponde a que la distribución espacial de un patrón de puntos es independiente de la distribución espacial del otro (Rozas y Camarero, 2005).

Análisis univariado

La función $K(r)$ de Ripley calcula el promedio de puntos que se encuentran alrededor de cada punto dentro del área de estudio, a diferentes rangos de distancia. El conteo se realiza en círculos de radio r con centro en cada punto perteneciente al patrón observado. La descripción del patrón se realiza entonces calculando la media de puntos observados en cada rango de distancia. Si un grupo de puntos se distribuye aleatoriamente (puntos independientes entre sí), con una densidad λ en la ventana de observación, el número esperado de puntos en un círculo de radio r es de $\lambda\pi r^2$. La desviación con respecto a este patrón, se puede calcular mediante la función K de Ripley (Ecuación 1), en donde queda reflejado el tipo (agregado, aleatorio o repulsivo), intensidad (que tan agregado o repulsivo) y rango (entre que distancias se producen estos procesos) de interacción del patrón espacial (Dixon, 2001).

$$K(r) = \frac{a}{(n*(n-1))} * \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I(d[i,j] \leq r) e[i,j] \quad (1)$$

En la ecuación 1, a es la superficie del área analizada, n es el número total de puntos. La sumatoria es realizada sobre todos los pares de puntos i y j . Además $d[i,j]$ es la distancia entre dos puntos, y $I(d[i,j] \leq r)$ es el indicador que agrega un individuo al conteo si la distancia es menor o igual a r . El término $e[i,j]$ corresponde a la corrección del efecto de borde (Baddeley y Turner, 2005). En este caso, el efecto de borde fue corregido usando la corrección de Ripley, recomendado para ventanas rectangulares (Ripley, 1988).

Análisis bivariado

El análisis bivariado de $K(r)$ de Ripley es utilizado para la detección de la interacción entre dos patrones de puntos diferentes, siendo posible detectar si ambos patrones presentan atracción, independencia o repulsión entre ellos, además de la intensidad y el rango de interacción (Lotwick y Silverman, 1982; Penttinen y Stoyan, 2000). Esto se realizó mediante el “análisis de patrones marcados” disponible en el paquete *spatstat* de

R (Baddeley, 2008). La función $K_{12}(r)$ (Ecuación 2) calcula el número de puntos del tipo 2 (individuos de regeneración), ubicados a una distancia menor o igual a r de los individuos del tipo 1 (individuos adultos).

$$K_{12}(r) = \frac{1}{n_1} * \frac{1}{n_2} * a * \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} I_{ij}(r) \quad (2)$$

En la ecuación 2, a es la superficie del área analizada n_1 y n_2 corresponde al número total de puntos del patrón 1 y 2 respectivamente. La sumatoria es realizada para el patrón de puntos 2, a una distancia r de cada punto en el patrón 1. $I_{ij}(r)$ es la función indicadora, que toma el valor de 1 si la distancia entre los puntos i y j es menor o igual a r y 0 en el caso contrario.

Apéndice 2: Método de cálculo de un modelo digital de elevación mediante la utilización de estereopares de fotografías aéreas.

La construcción de modelos digitales de elevación son obtenidos mediante estereoscopia, en donde, al observar dos imágenes obtenidas desde dos puntos de vista diferentes pero que representan una misma porción del terreno, se puede obtener una imagen tridimensional del área representada en ambas imágenes. Este proceso se puede realizar mediante la utilización de fotografías aéreas, las cuales son tomadas por sensores aerotransportados, donde se realizan líneas de vuelo que van tomando imágenes sucesivas, a una distancia constante entre ellas, y con un cierto porcentaje de recubrimiento, lo que permite tener dos puntos de vista para cada punto en el terreno. La obtención de las elevaciones relativas del modelo se realiza mediante el cálculo del paralaje, el que representa el desplazamiento aparente en el eje X de un punto fijo, de acuerdo al sistema de referencia de las fotografías (Figura I.1). El paralaje entonces depende de la distancia focal, la distancia entre la toma de las imágenes y de la elevación del punto, en donde el paralaje es directamente proporcional a la elevación de éste.

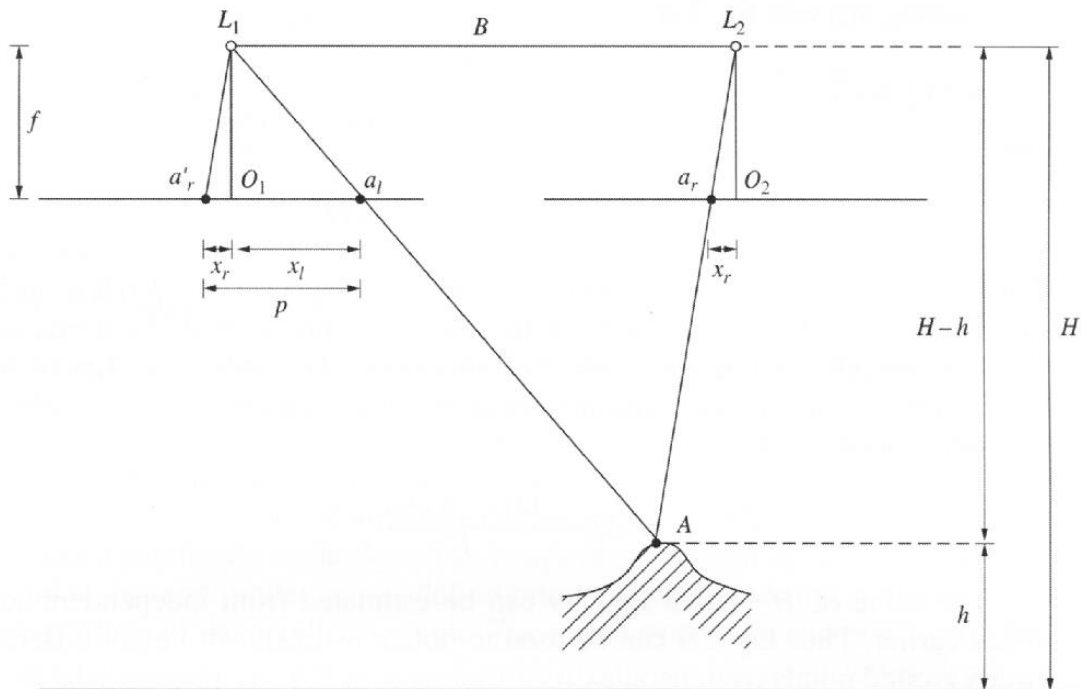


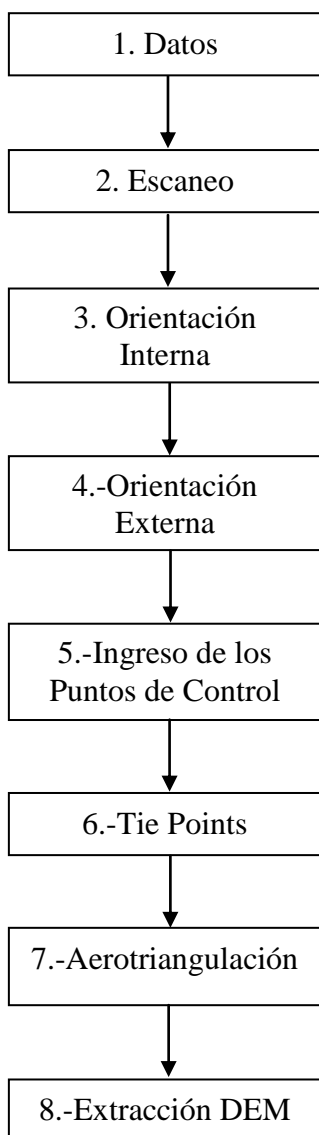
Figura II.1: Esquema del cálculo del desplazamiento paralaje en fotografías aéreas verticales con sobreposición.

En la Figura I.1 se observa el cálculo del paralaje, en donde se mide el desplazamiento aparente del punto A en cada fotografía, el cual es observado desde los puntos de vista L1 y L2. Aquí se utiliza como origen del sistema de referencia el centro óptico de cada toma y utilizando la ecuación 1 se puede obtener la elevación relativa para cada punto que se encuentre en el área de recubrimiento de las fotografías.

$$H - h = B * \frac{f}{p} \quad (1)$$

Donde, H = Altura de vuelo; h = elevación del punto observado; B = Distancia entre las tomas; f = Distancia focal, y p = paralaje.

Para la construcción de un modelo digital de elevación mediante las fotografías aéreas, primero es necesario ingresar los distintos características del sensor utilizado en el proyecto fotogramétrico, además de los distintos parámetros que permitan la orientación interna y externa de las fotografías. Luego de esto se construye el bloque fotogramétrico mediante la utilización de puntos de control terrestre, lo que permite establecer las relaciones entre las distintas fotografías y la relación de éstas con el terreno. A continuación se mencionan las etapas más importantes dentro del proceso de restitución fotogramétrica, que permitirán finalmente la extracción de un modelo digital de elevación utilizando fotografías aéreas con un porcentaje de recubrimiento (ERDAS, 2002)



1.- Es necesario contar por lo menos con un par estereoscópico, 3 puntos de control y 2 puntos de chequeo en el área de recubrimiento, en donde por lo menos uno de cada uno debe tener coordenadas (x,y,z) y, contar con la certificado de calibración del sensor.

2.- La resolución a la cual se realiza el escaneo de las fotografías dependerá de la resolución espacial que se quiere tener del DEM. Esto dependerá de la escala a cual fue realizada a la toma.

3.-La orientación interna se realiza mediante el ingreso de las distintas características del sensor, y obteniendo el origen del nuevo sistema de referencia de la fotografía mediante la ubicación de las marcas fiduciales. Con esto se pueden corregir las deformaciones radiales producidas en las fotografías.

4.-La orientación externa consiste en restablecer la posición a la cual fue tomada la fotografía mediante el ingreso de los ángulos Omega (Rotación en X), Phi (Rotación en Y), Kappa (Rotación en Z). En caso de no contar con ellos, estos ángulos se pueden obtener mediante el proceso de triangulación.

5.- Se ingresan los puntos de control obtenidos en terreno, con lo que se establece la relación entre las fotografías, y de las fotografías con el terreno.

6.- El proceso de identificación de Tie Point consiste en el establecimiento automático de puntos de correspondencia entre las fotografías en sus áreas de recubrimiento, lo que permite “amarrar” en más puntos los pares estereoscópicos.

7.- La aerotriangulación permite obtener los parámetros de orientación externa de las fotografías y las coordenadas de terreno de los puntos de “amarre” obtenidos en la etapa anterior, para así reducir la necesidad de apoyo terrestre.

Apéndice 3: Procesos de Poisson

Proceso homogéneo de Poisson

Este proceso corresponde a la hipótesis de la completa aleatoriedad espacial. De acuerdo a Stoyan y Penttinen (2000), tienen dos características principales:

- a) El número de puntos en cualquier región B que tiene una distribución de Poisson, tiene una media de $\lambda\nu(B)$.
- b) Dado n puntos en la región B, la ubicación espacial de cada uno de ellos se comporta como una muestra totalmente independiente de la distribución en B. Es decir, cada punto es independiente de los demás.

Un proceso es homogéneo cuando la intensidad de primer orden λ (densidad) es constante en toda el área de estudio. El proceso se denomina de Poisson ya que la probabilidad de encontrar n puntos en un área B, es la misma en cualquier posición dentro del área de estudio, y su posición es independiente de los otros puntos. El proceso de Poisson es convencionalmente usado como punto inicial en la construcción de modelos, donde uno de los primeros pasos es testear la hipótesis de la completa aleatoriedad espacial (Stoyan y Penttinen, 2000).

Proceso Inhomogéneo de Poisson

Un proceso inhomogéneo de Poisson es una modificación de un proceso de homogéneo de Poisson, el cual de acuerdo a Stoyan y Penttinen (2000) tiene las siguientes propiedades:

- a) El número de puntos en cualquier región B sigue la distribución de Poisson con media $\int_B \lambda(x)dx$.
- b) Dados n puntos en una región B, su posición es una muestra independiente de la distribución con densidad $\lambda(x) / \int_B \lambda(x)dx$.

En el proceso Inhomogéneo de Poisson, es remplazada la intensidad constante λ utilizada para el proceso homogéneo, por la función $\lambda(x,y)$ la cual varía con la posición (x,y) , pero la ocurrencia de cualquier punto permanece independiente de los otros (Baddeley, 2008). El proceso inhomogéneo de Poisson es utilizado para la modelación de procesos puntuales en ambientes heterogéneos (Stoyan y Penttinen, 2000).

La heterogeneidad espacial es expresada mediante las diferentes variables espacialmente explícitas, las cuales pueden ser reflejo de distintos procesos ecológicos o perturbaciones que han ocurrido, y que han permitido que se establezca un individuo. La inclusión de covariables pueden dar señales de las variables ambientales en las cuales se favorece el proceso de establecimiento de las plántulas de *Jubaea chilensis*. Las variables son expresadas como imágenes que son utilizadas en el ajuste del modelo en R, incluidas como una lista asociada al patrón de puntos. Para esto, el único requisito es que el área de estudio tenga en toda su extensión valores de cada una de las variables (Baddeley y Turner, 2006).

Proceso agrupado de Poisson

El proceso de agrupado de Poisson o proceso de Cox puede ser visto como el resultado de dos procesos aleatorios en dos etapas distintas. En la primera etapa se genera un proceso de Poisson con una función de intensidad $\lambda(x)$, para luego generar un segundo proceso de Poisson alrededor de cada uno de los puntos, con una intensidad variable (Stoyan y Penttinen, 2000).

El modelo de Cox tiene una debilidad, ya que no garantiza una distancia crítica mínima entre los puntos, por lo que entrega valores muy variables a distancias cortas (Moller et al., 1997). En Bosque maduros es común observar una cierta regularidad de los árboles a distancias cortas, lo que denota la existencia de una distancia mínima crítica que es posible de reflejar con este tipo de modelo. Sin embargo, este problema tiene menos efectos al modelar la regeneración, la cual puede presentar agrupaciones a menores distancias. Este proceso incorpora una forma explícita de agrupamiento espacial y por lo tanto proporciona una base bastante satisfactoria para modelar patrones agregados, la cual se basa principalmente en:

- a) Existe un conjunto de puntos “padres” con distribución completamente aleatoria e intensidad ρ .
- b) El número de puntos “hijos” de cada padre sigue una distribución de Poisson con media m .
- c) Los puntos “hijos” se distribuyen alrededor de los padres siguiendo una distribución Gaussiana Bivariada, con media 0 y varianza σ^2 en x e y .

De acuerdo a Waagepetersen (2007), la función K teórica para el ajuste de este tipo de modelo corresponde a:

$$K(r; \sigma, \rho) = \pi * r^2 + \frac{1 - \exp(-r^2 / 4 * \sigma^2)}{\rho} \quad (5)$$