

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

**EFFECTO DEL ENTORNO DE UN ÁREA PROTEGIDA EN LA DINÁMICA Y
PERSISTENCIA DE UNA POBLACIÓN DE CARNÍVOROS SOMETIDA A
VARIABILIDAD AMBIENTAL**

ANDRÉS ALEJANDRO BAEZA CASTRO

SANTIAGO-CHILE
2005

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

**EFFECTO DEL ENTORNO DE UN ÁREA PROTEGIDA EN LA DINÁMICA Y
PERSISTENCIA DE UNA POBLACIÓN DE CARNÍVOROS SOMETIDA A
VARIABILIDAD AMBIENTAL**

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero en Recursos
Naturales Renovables

ANDRÉS ALEJANDRO BAEZA CASTRO

Profesor Guía

Calificaciones

Sr. Cristián Estades M.
Ingeniero Forestal, PhD

7.0

Profesores Consejeros

Sra. Audrey Grez V.
Licenciada en Ciencias Biológicas
Magíster en Ciencias Biológicas

7.0

Sr. Andrés De la Fuente D. la F.
Ingeniero Agrónomo

6.5

SANTIAGO - CHILE
2005

Agradecimientos

Mis más sinceros agradecimientos a todos los que contribuyeron en alguna medida a la realización de este trabajo, en especial a:

- Mis padres, por el apoyo y la confianza que siempre han tenido en mí, y por darme la posibilidad de estudiar. Y a Daniela, mi hermana, por su compañía y ayuda cuando la necesité.
- Don Cristian Estades, por su dedicación y creatividad como profesor guía y por la confianza puesta en este proyecto.
- Doña Audrey Grez, que en su calidad de profesor consejero, criticó de manera beneficiosa y oportuna este trabajo.
- Don Andrés De la Fuente por el aporte como profesor consejero.
- Don Rodolfo Gajardo, por su contribución en la parte final de mi memoria y por las apasionantes conversaciones epistemológicas que tuvimos en este periodo.
- Mis amigos, que siempre entregaron conocimiento en los momentos de no-tesis.
- Fundación País Digital, Universia y Banco Santander, por la Beca recibida para finalizar este trabajo.
- La gente del Laboratorio de Ecología de Vida Silvestre (LEVS), en especial a Jorge.

Gracias

A mis padres

ÍNDICE

RESUMEN	1
SUMARY	2
INTRODUCCIÓN	3
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	7
Sistema Nacional de Áreas Protegidas	7
Variabilidad Ambiental, Áreas protegidas y Carnívoros	8
Teoría de Sistemas y Complejidad Ecológica	9
Modelos basados en individuos (IBMs)	11
MATERIALES Y MÉTODO	13
Materiales	13
Método	13
El Modelo	14
Conceptualización del Modelo.....	14
Construcción del Modelo.....	16
Escala y Resoluciones.....	16
Algoritmos de procesos ecológicos simulados.....	18
Pruebas, parámetros y condiciones iniciales.....	36
Experimentos	38
Variables Respuestas	43
RESULTADOS	45
Comportamiento general del modelo	45
Resultados de los experimentos	47
DISCUSIÓN	53
CONCLUSIÓN	57
LITERATURA CITADA	59
APÉNDICES	63

RESUMEN

Un área protegida es un espacio de tierra o mar destinado a la protección y mantención de los recursos naturales y culturales asociados a ésta. Los animales que habitan dichas áreas traspasan los límites administrativos, afectando su viabilidad en función de los patrones y procesos que se manifiestan en el entorno. Por otra parte, las diferentes condiciones ambientales pueden aumentar o disminuir esta viabilidad en el tiempo. Este trabajo se realizó para conocer el efecto de la calidad del hábitat del entorno de un área protegida, sobre la dinámica y persistencia de una población de carnívoros en el interior de dicho espacio y sometido a variabilidad ambiental. El método utilizado fue el desarrollo de un modelo de simulación espacialmente explícito en base a individuos llamado **Eco_Lógica 1.0** que, a través de la creación de algoritmos ecológicos, simuló una relación en el espacio de tres especies virtuales, del tipo sustrato vegetal-presa-carnívoro. Con el modelo se realizaron tres experimentos. Cada experimento se compuso de 9 diferentes escenarios espaciales compuestos por diferentes combinaciones de calidad de hábitat (Ccal) para el exterior e interior de un espacio protegido y una diferente variabilidad ambiental (S). El interior y el exterior del área protegida se definieron como Bueno (Ccal=12), Medio (Ccal=10) y/o Malo (Ccal=7), en función a tres diferentes calidades de hábitat que representaron el potencial de crecimiento del algoritmo ecológico del sustrato. La variabilidad ambiental, también ingresada al algoritmo ecológico del sustrato, se creó con una secuencia de datos de tipo normal con media igual a 1 y tres diferentes desviaciones estándar (S = 0; nula variabilidad, S = 0.3; media variabilidad y S = 0.6; alta variabilidad).

Los resultados mostraron una marcada disminución de la densidad poblacional de la población de carnívoros en el interior del área protegida cuando las condiciones de exterior fueron muy negativas. Así también, la persistencia de la población disminuyó considerablemente a medida que la variación ambiental era mayor. Por otra parte, en los tres experimentos, la densidad poblacional del escenario más realista (Exterior Malo-Interior Bueno), tendió a decrecer en el tiempo. Estos resultados demuestran la importancia del entorno de un área protegida sobre una población de carnívoros que habita dicho espacio.

Con **Eco_Lógica** se creó un ecosistema virtual que puede proporcionar una herramienta de estudio para diferentes preguntas del ámbito de la ecología y su relación con el espacio en general.

Palabras Clave: área protegida, entorno de un área protegida, carnívoro, variabilidad ambiental, modelo de simulación en base a individuos.

SUMMARY

A protected area is an area of land or sea that is dedicated to the protection and maintenance of the natural and cultural resources associated with it. The animals that inhabit said areas cross the administered limits, affecting its viability in function of the patterns and processes that are manifested in its surroundings. However, the different environmental conditions can increase or diminish this viability throughout time. This work was done to understand the effect that the quality of habitat of the surroundings of a protected area has on the dynamics and persistence of a population of carnivores in the interior of such a space that is subjected to environmental variability. The method used for this study was the development of a spatially explicit simulation model, based on individuals called **Eco-Lógica 1.0** that, through the creation of ecological algorithms, simulated a spatial relationship among three virtual species of the type vegetation substrate-prey-carnivore. Three distinct types of experiments were done with the model. Each experiment was composed of nine different spatial scenarios, each with a different combination of quality of habitat (Ccal) for the exterior and interior of a protected area and with different environmental variability (S). The interior and exterior of a protected area was defined as Good (Ccal=12), Medium (Ccal=10) and/or Bad (Ccal=7), in function of three different qualities of habitat that represented the potential of growth of the ecological algorithm of the substrate. The environmental variability, also entered into the substrate algorithms, was created with a sequence of data of normal type with the average equal to 1 and three different standard deviations (S=0; null variability, S=0.3; medium variability and S=0.6; high variability).

The results showed a marked decrease in the density of the population of carnivores in the interior of a protected area when the exterior conditions were very negative. Moreover, the persistence of the population decreased considerably when the environmental variation was greater. In addition, in the three experiments, the population density of the most realistic scenario (Bad Exterior-Good Interior) tended to decrease throughout time. These results show the importance of the surroundings of a protected area on the carnivore population that inhabits such a place.

Eco-Lógica, with its capability of creating virtual ecosystems such as the one developed for this study, provides a valuable tool for the investigation of different issues in the field of ecology and its relation to physical space in general.

Key words: protected area, surroundings of a protected area, carnivore, environmental variability, individual based model

INTRODUCCIÓN

Un área protegida se puede definir como un “área de tierra y/o mar especialmente dedicada a la protección y mantención de la diversidad biológica y de los recursos culturales asociados” (IUCN, 1994). A través de la promulgación de leyes y reglamentos, las áreas destinadas a la protección pretenden mantener ciertas características que sean favorables para la persistencia de las especies presentes.

Uno de los principales problemas identificados en el cuarto congreso internacional de áreas protegidas (IUCN, 1994) es la visión de islas, separadas de los alrededores, que tienen los espacios destinados a la protección. Esto se relaciona fuertemente con que los instrumentos legales sólo tienen valor dentro de unos límites administrativos que las especies con capacidad de movimiento no perciben como tal. Fuera de los límites, legales y artificiales por lo demás, de las áreas protegidas, las especies pueden tener mayor o menor vulnerabilidad en función de los procesos y patrones que se manifiesten, como por ejemplo, según el uso antrópico del suelo o por las propias condiciones naturales presentes en las afueras. En este sentido, el medio o el espacio en el cual los organismos de una población, comunidad o ecosistema se desenvuelven, ha cambiado la forma de analizar los problemas de la protección y conservación de áreas.

Este trabajo aborda una línea de investigación de suma importancia para la conservación y gestión de las áreas protegidas como es la relación de éstas con los sectores aledaños, donde existe una marcada dependencia entre los asentamientos humanos y las poblaciones animales y vegetales que forman parte de una unidad ecosistémica. Lamentablemente esta estrecha dependencia ha ido desequilibrándose en el último tiempo y actualmente la presión que sufren los ambientes naturales, pone en riesgo la sustentabilidad a largo plazo de dichos ambientes, aun cuando existan espacios destinados a la protección y conservación. La sustitución de ambientes naturales por otros más productivos económicamente (Ej: industrias, caminos, etc.), la contaminación de las aguas,

la desertificación, etc., son algunos de los problemas ambientales a los que se enfrentan los gobiernos en estos tiempos y que tienen estrecha relación con los ambientes naturales y su persistencia o sustentabilidad en el tiempo. Por lo tanto es preciso un manejo más integrado de los recursos naturales y su compatibilidad con el crecimiento económico y cultural de las comunas, provincias o regiones de nuestro país.

Los sistemas ecológicos y la vida en general son variables y dinámicos en el tiempo y en el espacio, dependiendo de las características propias de los individuos que componen dichos ecosistemas y por las restricciones físicas impuestas por el medio ambiente en el cual habitan.

Por otra parte, la ecología teórica ha hecho evidente el rol que juega la heterogeneidad y los movimientos de los individuos sobre las poblaciones animales y vegetales de un área (Turchin, 1998) y ha puesto énfasis en los patrones y procesos ecológicos que se exhiben en un área a diferentes escalas espaciales y temporales. Si tenemos en consideración que estos patrones y procesos interfieren, directa o indirectamente, sobre los propios individuos, podemos inferir que el espacio influirá en alguna medida sobre los parámetros poblacionales de las especies presentes, como la densidad o la persistencia a través del tiempo. Por otra parte, si tomamos en cuenta que en el interior de un área protegida los niveles de productividad no siempre son los mismos, dependiendo de las condiciones ambientales dominantes en ciertos periodos de tiempo, es posible pensar que estas variaciones puedan influir en la dinámica de una población, de tal manera que el efecto del espacio externo a las áreas protegidas cumpla un rol fundamental en periodos en que las condiciones, ya sea dentro o fuera de un área protegida, no sean favorables para una población. Para las poblaciones de carnívoros presentes en un área protegida, esta hipótesis tiene mayor relevancia debido principalmente a la gran capacidad de movimiento de estas especies con respecto a un área protegida.

El objetivo de esta Tesis fue conocer, de manera teórica y a través de la simulación, cómo responden los individuos de una población de carnívoros en diferentes condiciones de hábitat en el interior y el exterior de un área silvestre protegida, y en qué medida la variabilidad ambiental modifica la dinámica de esta población. Para ello, se presenta una detallada descripción de la problemática actual en las áreas protegidas y la relación de

estos espacios con su exterior y con la variabilidad ambiental. Posteriormente se relaciona el problema propuesto con los fundamentos teóricos del modelamiento ecológico y la unión de estos con la teoría de los Sistemas Complejos.

El método utilizado consistió en elaborar tres experimentos con un modelo de simulación espacialmente explícito, basado en individuos virtuales pertenecientes a tres niveles tróficos, sustrato vegetal, presa (herbívoro) y depredador, donde el depredador represente en este caso a un carnívoro. El modelo creado fue llamado **Eco_Lógica 1,0** ya que los algoritmos ecológicos creados son muy simple y mantienen una estructura generalmente lógica.

La hipótesis que se pretende contrarrestar con los resultados es que la dinámica y la persistencia de una población de carnívoros al interior de un área protegida, son afectadas por el entorno en diferentes condiciones de variabilidad ambiental.

Objetivo General

Conocer el efecto del entorno de un área protegida sobre la dinámica y persistencia de una población de carnívoros sometida a diferentes oscilaciones ambientales.

Objetivos Específicos

Conocer el efecto de la calidad del hábitat del entorno sobre la dinámica y persistencia de una población de carnívoros al interior de un área protegida.

Conocer el efecto de la variabilidad ambiental en la dinámica y persistencia de una población de carnívoros.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE)

A través de la ley 18.362 de 1984 se creó en nuestro país el sistema nacional de áreas protegidas del estado (SNASPE). Su finalidad es la protección y manejo de áreas únicas o representativas de la biodiversidad del país, así como la mantención y mejora de los recursos de la flora y la fauna silvestres y de la capacidad productiva de los suelos y de los sistemas hidrológicos naturales (Tallar, 2000). Este sistema cuenta en la actualidad con 94 unidades protegidas repartidas en el territorio nacional a través de 31 parques nacionales, 48 reservas y 15 monumentos nacionales correspondiente a 14 mil hectáreas lo cual representa el 19% del territorio nacional (CONAF, 2005).

Un aspecto importante en el problema de la protección de especies dentro de las áreas protegidas, es que los planes de protección no consideran el exterior de ésta, el cual para muchas especies representa parte de su ámbito de hogar. Esto es importante por cuanto, las áreas destinadas a la protección de la flora y fauna no siempre cumplen con los requerimientos de espacio necesarios. De hecho, sólo el 45% de éstas poseen las exigencias para la mantención de carnívoros (Simonetti y Mella, 1997). Fuera de los límites de protección, los patrones y procesos pueden variar drásticamente aumentando la vulnerabilidad de los individuos de diferentes especies que atraviesan estos límites, principalmente por la caza ilegal y por la sustitución del hábitat (Miller et al., 1983).

Variabilidad ambiental, Áreas protegidas y Carnívoros

Para cualquier especie las características del medio ambiente en el cual se desarrolla afectan de manera no lineal a la dinámica de sus poblaciones. Es decir, los efectos producidos por las condiciones ambientales dominantes no siempre son proporcionales al efecto producido en la densidad o persistencia de una población en el tiempo, principalmente porque estos efectos se manifiestan de manera heterogénea en el paisaje y afectan al individuo propiamente tal. Se ha demostrado, por ejemplo, que la variación de la temperatura en el Parque Nacional Maremma (Italia central) modifica la abundancia de alimento para el zorro rojo (*Vulpes vulpes*). A su vez esta modificación afecta, en diferente medida, el tamaño del ámbito de hogar “home range” de los individuos de esta especie (Lovari et al., 1993). Otra evidencia empírica del efecto climático sobre poblaciones fue descrito por Holmgren et al. (2001), quienes demostraron que los eventos de El NIÑO producen aumentos en el número de individuos de pequeños roedores en la zona de Fray Jorge (IV Región). Existe la hipótesis de que los carnívoros presentes en la zona (zorro culpeo; *Pseudalopex culpaeus*) también se ven afectados indirectamente por estos eventos, lo cual sugiere un efecto ecosistémico de abajo hacia arriba, aún cuando también pueden haber efectos directos sobre los carnívoros en diferentes magnitudes. Estos ejemplos grafican cómo un fenómeno que afecta a una escala mayor producen modificaciones a nivel del individuo y posteriormente a nivel poblacional y comunitario. En definitiva se trata de fenómenos complejos difíciles de cuantificar y que deben ser analizados desde diferentes escalas y con alto grado de detalle.

Las variaciones ambientales presentes en diferentes periodos de tiempo modifican el paisaje dentro y fuera de un área protegida, con lo cual se modifica completamente la dinámica de todo el ecosistema. De hecho, los procesos estocásticos (variabilidad ambiental), sumados a un fuerte efecto de borde en las áreas protegidas, pueden contribuir a la extinción de los grandes carnívoros (Woodroffe y Ginsberg, 1998). Con respecto a lo anterior, es un hecho de que las especies se mueven hacia fuera o hacia dentro de los

parques y reservas producto de los cambios climáticos (Hannah et al., 2005; Peters y Darling, 1985), lo cual conlleva una serie de problemas propios al manejo de las áreas protegidas. Por ejemplo, en el parque nacional Tsavo en Kenia, la depredación por parte de leones (*Panthera leo*) hacia animales de crianza tiene una alta correlación con eventos de sequía (Patterson et al. 2004). Salvatori et al. (1999) estudiaron la dinámica de una población de zorros culpeos en el parque Fray Jorge y demostraron que la búsqueda alternativa de alimento por parte del zorro en las afueras del parque aumentaba la probabilidad de que los animales fueran cazados por las personas. Más aún, la principal causa de mortalidad de carnívoros protegidos, es el conflicto de éstos con los humanos más allá de los bordes de las áreas protegidas (Woodroffe y Ginsberg, 1998). Por lo tanto, es preciso tomar en consideración el impacto de los cambios climáticos y el efecto del entorno en el manejo de las poblaciones de carnívoros dentro de las áreas protegidas. En este contexto, el entorno de un área protegida puede tener serias implicancias para la conservación de los carnívoros.

Teoría de sistemas y Complejidad Ecológica

La Teoría general de sistemas se presenta como una forma sistemática y científica de aproximación de la realidad (Arnold y Osorio, 1998). Un sistema es un conjunto de cosas o partes interactuantes e interdependientes que se relacionan formando un todo unitario y complejo. Estos pueden ser abiertos o cerrados según el grado de aislamiento. Por otra parte los sistemas pueden ser descritos en términos matemáticos y lógicos, y el grado de abstracción de éstos se relaciona con el conocimiento que se tenga o con la complejidad que se quiera representar. Los sistemas ecológicos son muy complejos y termodinámicamente abiertos, por lo tanto su estudio se centra en el marco de la complejidad ecológica.

Según Margalef (2000) el organismo es la base de una población y en función de éstos, como unidad, se deberían hacer todos los estudios de dinámicas poblacionales. Esta aseveración tiene mucha importancia desde que se ha demostrado el efecto de las variaciones individuales sobre la dinámica de las poblaciones (Huse et al., 2000 y Kaiser, 1974 citado en Grimm, 1999). Por ello, se deben investigar los efectos producidos por las variaciones ambientales sobre los organismos y luego analizar los patrones emergentes a escala poblacional.

Este trabajo intenta responder la siguiente pregunta: ¿cómo influyen las condiciones exteriores de un área protegida en la persistencia de una población de carnívoros sometida a diferentes variaciones ambientales? La respuesta a esta pregunta no es trivial debido principalmente a la complejidad presente en cualquier ecosistema, pero... ¿que es un sistema complejo y que relación tiene éste con la ecología?

Un sistema complejo (SC) se puede definir como un conjunto de entidades relativamente similares que interactúan unas con otras y con su medio ambiente de manera no lineal, produciendo comportamientos emergentes que no se pueden explicar de una manera aislada y sin conocer la evolución temporal del sistema. De manera teórica, un SC mantiene una estructura interna, llamada esquema, que le permite obtener regularidades de un conjunto de datos de entrada, donde la mayoría son datos aleatorios (Gell-Mann, 2000).

Un ecosistema también es un sistema complejo adaptativo, la analogía se manifiesta en cuatro puntos fundamentales: Primero, existe gran número de componentes interactuando (individuos). Segundo, cada componente interactúa con otro de manera no lineal (esquema interno). Tercero, un ecosistema obtiene y genera patrones (regularidades) de una gran cantidad de datos de entrada (temperatura, precipitación, presión, sonidos, etc.). Y cuarto, los ecosistemas modifican el esquema interno a diferentes escalas espaciales y temporales (evolución y/o sucesión) (Margalef, 1980).

Todo lo anterior se enmarca en un nuevo concepto llamado complejidad ecológica que tienen por finalidad el estudio de la estructura poblacional de los ecosistemas pero a través de factores que actúan a escala del organismo (Kostova y Carlsen, 2004). Una manera para abordar el estudio de sistemas complejos es a través de la modelación en base al individuo.

Modelos basados en individuos (IBMs)

Los modelos basados en individuos (**IBMs**) han sido utilizados ampliamente en los últimos 15 años por los ecólogos (Lomnicki, 1992; Grimm, 1999; Parrot y Kok, 2000). En este enfoque la unidad principal es el individuo propiamente tal (Parrott y Kok, 2000) y consiste en crear un ambiente, algunas veces georeferenciado o simplemente referenciado, en donde organismos interactúan unos con otros, modificando sus características a través del tiempo (Kostova y Carlsen, 2004), según un conjunto de reglas creadas en un programa computacional. Transcurrido un periodo de tiempo, según las interacciones ocurridas, emergen patrones a una escala superior, en este caso la población propiamente tal. Esa es la esencia de los modelos basados en los individuos: la derivación de propiedades de los sistemas ecológicos a través de las propiedades de los individuos de ese sistema (Lomnicki, 1992).

Ventajas

Una de las principales ventajas es que la construcción de este tipo de modelos es más simple que la construcción de modelos poblacionales convencionales con ecuaciones diferenciales (Railback, 2001). Por otra parte, los modelos convencionales con variables estado asumen que todos los individuos son iguales, cosa que se contradice con la evidencia empírica (Grimm, 1999). Además, los modelos convencionales mantienen un determinismo pocas veces encontrado en la naturaleza y donde la mayoría de éstos no toman en cuenta al espacio real (Margalef, 1980), aún cuando la mayoría de los procesos ecológicos son locales, relacionados con el espacio y afectan al individuo propiamente tal (Grimm, 1999). La modelación en base al individuo permite conocer las respuestas de la población en función de las diferencias individuales de los organismos, es decir, de las interacciones de los diferentes individuos con su medio ambiente.

Desventajas

Existe una dificultad práctica en la construcción de sistemas complejos, y viene dada por la imposibilidad de definir los límites exactos del sistema (Ulanowicz, 2004). Por ejemplo nosotros sabemos que en un ecosistema coexisten una gran cantidad especies, pero desde el punto de vista práctico es imposible incluirlas a todas en un modelo de simulación, por lo cual debemos tener un límite de especies. En este sentido es preciso ingresar condiciones de impredecibilidad o aleatoriedad en la construcción de modelos biológicos (Banks y Potter, 2004) y ecológicos para incluir teóricamente a otro tipo de agentes y/o fenómenos que forman parte del universo cercano del sistema pero que no se incluyen de manera implícita en los modelos. Esta dificultad se relaciona muy fuertemente con la hipótesis de que es imposible obtener las configuraciones iniciales de un sistema biológico, debido a los fenómenos probabilísticos originados en el nivel fundamental del sistema (Kauffman, 2000).

MATERIALES Y METODOS

Materiales

Para la realización del proyecto fue necesario contar con ordenadores de alta velocidad y gran capacidad de procesar y almacenar información. La programación computacional fue realizada en un lenguaje de programación acorde con las necesidades del estudio. Las simulaciones fueron realizadas en el Laboratorio de Ecología de Vida Silvestre (**LEVS**) del Departamento de Manejo Forestal, perteneciente a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile.

Método

Para cumplir los objetivos planteados anteriormente se creó un sistema complejo a través de la construcción de un modelo de simulación probabilístico y espacialmente explícito basado en el individuo. Se creó una comunidad con tres especies en un orden jerárquico dividido en componentes funcionales operando a diferentes escalas (Simon, 1962 citado en Urban et al., 1987). Es decir, el modelo tiene un sustrato vegetal, una presa (herbívoro) y un carnívoro que representan los diferentes componentes funcionales, cada uno es un conjunto de individuos que modifican sus características según reglas definidas para cada componente, y actuando en tiempos y espacios diferenciados, simulando con esto diferencias de escala. La finalidad del modelo fue observar los cambios en los

parámetros poblacionales del carnívoro, como la persistencia y la densidad en un período prolongado de tiempo.

El método que se utilizó fue, como se mencionó anteriormente, la simulación a través de la modelación en base al individuo. El primer punto fue crear el modelo propiamente tal a través de la realización de algoritmos que simulaban variables ecológicas de estado, el modelo fue bautizado **Eco_Lógica 1.0**, ya que la estructura del código es muy simple desde el punto matemático pero las relaciones entre componentes crea una dinámica compleja. Posteriormente se realizaron tres experimentos donde se generaron diferentes escenarios de áreas protegidas y entornos y diferentes regímenes de variabilidad ambiental.

El Modelo

Conceptualización del Modelo

El Modelo **Eco_Lógica 1.0** está compuesto por matrices que representan poblaciones virtuales de presa (herbívoro) y carnívoro (depredador), donde cada organismo es representado con características propias de peso y posición en el espacio (Figura 1), estos individuos se encuentran repartidos heterogéneamente en un espacio virtual referenciado (píxeles), donde cada punto de éste espacio contiene un nivel de sustrato. Cada individuo de cada población realiza procesos ecológicos en diferentes periodos temporales. Dichos procesos ecológicos se modelan a través de algoritmos que tienen la característica de aumentar de complejidad desde el nivel de sustrato hasta la población de carnívoros. Este aumento se puede medir en función de la longitud del esquema, es decir la cantidad de líneas de programación utilizadas. A mayor longitud mayor complejidad. Esta característica se manifiesta continuamente en las relaciones de poblaciones reales y en cualquier red trófica (Margalef, 1980; Odum, 1986). Una mayor complejidad implica

mayor nivel de información y por lo tanto una mayor eficiencia en la obtención y utilización de la energía. Esto se manifiesta en las diferentes estrategias con las que los individuos llevan a cabo sus procesos ecológicos (Margalef, 2000), como movimiento, reproducción, excreción, etc.

Aún cuando el sistema dista mucho de la realidad y pueden ser blanco de muchas críticas, la idea fundamental de los procesos simulados es mantener una estructura lógica, acorde con la estructura encontrada en la mayoría de las relaciones depredador-presa, donde los efectos en un nivel producen modificaciones no lineales a otros niveles superiores, a través de las relaciones de los individuos de diferentes niveles con su medio ambiente más cercano. Esta estructura lógica permite obtener resultados emergentes en el nivel de la población de carnívoros sin modificar su comportamiento.

Individuo	Peso	Posición X	Posición Y
1	P_1	X_1	Y_1
2	P_2	X_2	Y_2
3	P_3	X_3	Y_3
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
n	P_n	X_n	Y_n

Figura 1: Matriz de población. Cada individuo tiene un peso y una ubicación espacial.

Construcción del Modelo

Para cada nivel funcional del modelo se crearon algoritmos ecológicos con una estructura lógica y secuencial (**Anexo 1**). Cada nivel del modelo (sustrato-presa-depredador), fue creado con funciones muy simples en términos matemáticos, pero con una interacción de conjunto que determina la no-linealidad en los datos de salida. Por otra parte, el sistema contiene un conjunto de variables probabilísticas que pretenden dar una estructura de límite difuso al sistema que representa la falta de información que tenemos de cualquier ecosistema y de las relaciones entre sus componentes.

Antes de conocer mejor los algoritmos creados es necesario conocer el dominio espacial y temporal del sistema, es decir necesitamos conocer las escalas y resoluciones en las que se incluyen dichos algoritmos.

Escalas y Resoluciones

La escala y resolución temporal. El sistema funciona en un periodo de análisis de 120 “años”, cada año tiene 6 periodos, los cuales, a su vez cuentan con 30 intervalos de tiempo que representan los días. Es decir cada año tiene 180 iteraciones o “días”. De aquí en adelante se llama a cada ciclo año, mes y día, con lo cual será más fácil explicar los fenómenos ecológicos simulados según cuándo estos ocurran (**Figura 2**). A modo de ejemplo, podemos decir que la reproducción de las presas y carnívoros ocurre una vez cada año.

La escala y resolución espacial. El área definida en el proyecto comprende una superficie de 200 x 200 unidades mínimas areales (píxeles), la cual se divide en un área de 100 x 100 unidades que representan el área silvestre protegida; el resto del espacio representa el exterior de ésta (**Figura 3**). Por lo tanto, el sistema contiene 40.000 celdas de las cuales 10.000 representan el área protegida y 30.000 el espacio exterior.

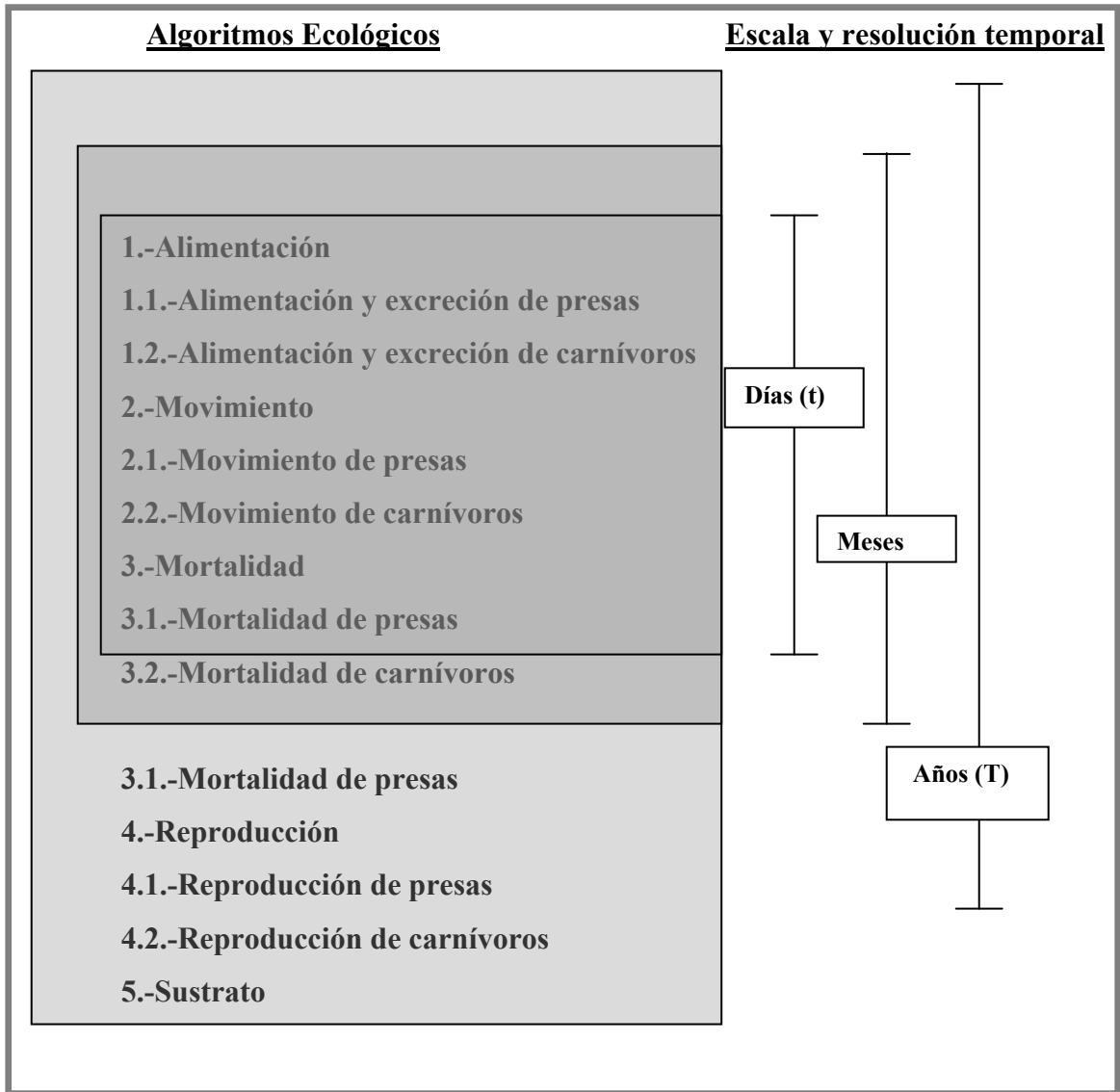


Figura 2: Algoritmos ecológicos utilizados en **Eco_Lógica 1.0** y su respectiva escala y resolución temporal.

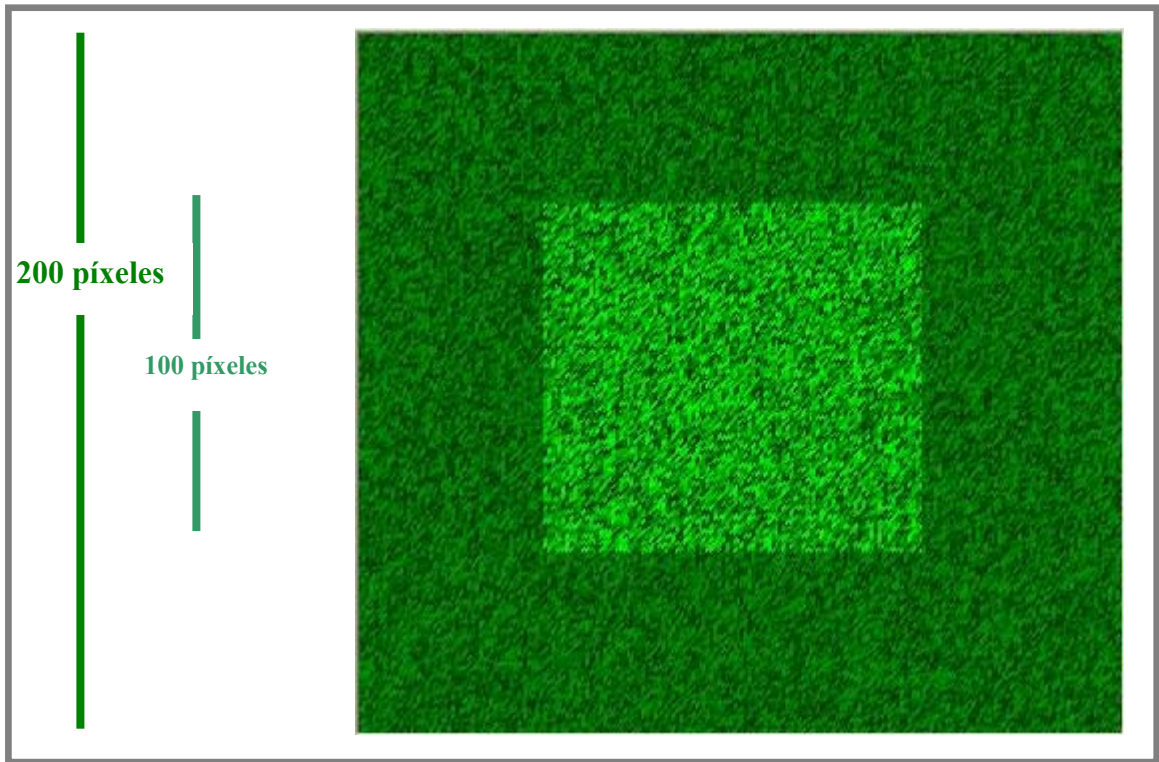


Figura 3: Espacio simulado. El color verde oscuro representa la superficie exterior al área protegida, mientras que en color verde claro se visualiza el área protegida (100 x 100).

Algoritmos de procesos ecológicos simulados

A continuación se entrega una detallada explicación los algoritmos ecológicos simulados en el mismo orden que aparecen en la Figura 2.

1.-Alimentación y Excreción

1.1-Alimentación y Excreción de presas

1.1.1.-Alimentación de presas. Cada presa se alimenta del sustrato presente en la posición que ésta se encuentre, y depende de la probabilidad de alimentarse (*Pal*; Ec. 1). Esta probabilidad se define como la razón entre el sustrato presente y la capacidad de carga de éste (ver algoritmo Sustrato). Si el individuo tiene éxito en alimentarse, el nivel del sustrato

disminuye en relación a una tasa de consumo **Cons** (Ec. 2). Cabe señalar que mientras más es la depredación de una zona por parte de una o varias presas, menor es el sustrato y por ende menor es la probabilidad de alimentarse y mayor la probabilidad de moverse (ver movimiento de presas). Esta estructura disminuye la pérdida total de sustrato en un lugar determinado y facilita el desplazamiento a zonas con mayor nivel de sustrato.

$$Pal = Su_{(i,j)}^t / K \quad \in [0 - 1] \quad ; \quad Ec. 1$$

Donde

t : tiempo en días

Pal: Probabilidad de alimentarse por parte de una presa en un píxel

Su_(i,j)^t: Nivel de sustrato en la celda **i**, **j** en tiempo **t**

K: Capacidad de carga de sustrato

Si **Pal** mayor a un número aleatorio entonces el nivel de sustrato disminuye

$$Su_{(t)} = Su_{(t-1)} - cons \quad ; \quad Ec. 2$$

Donde:

cons: Consumo de sustrato

Su_(t): Nivel de sustrato posterior a la depredación

1.1.2.-Excreción de presas: En **Eco_Lógica** los individuos de presa mantienen el mismo peso, independiente de si se alimento o no, por ende teóricamente la excreción es igual al consumo en todo momento. Esto se fundamenta en que las especies inferiores en las cadenas tróficas se pueden considerar como válvulas abiertas en relación a la eficiencia energética (Margalef, 2000).

1.2.-Alimentación y excreción de carnívoros

1.2.1.-Alimentación de carnívoros: El algoritmo de alimentación de un individuo carnívoro se realiza en forma diaria y depende de cuatro factores ordenados de manera secuencial:

- El espacio-tiempo
- El peso del individuo
- La eficiencia en la caza. y,
- El nivel de satisfacción

Estos pasos del algoritmo son secuenciales, es decir ocurren uno detrás del otro y si uno de estos no se cumple el individuo no se alimentará, por ende se explicará cada uno de manera separada y secuencial como ocurren en el modelo (Figura 4).

El espacio tiempo: El factor más extraño y quizás el más importante es la variable espacio-tiempo. Todos los pasos siguientes no tienen sentido si el carnívoro no tiene la “suerte” de encontrar una presa en su posición y en el instante adecuado. Aún cuando en el modelo esta suerte tiene que ver con la pseudoaleatoriedad computacional propuesta en los algoritmos de movimiento, en la vida real también se manifiesta este fenómeno. Sin ahondar demasiado en el tema, la aleatoriedad real tiene su base en la física de partículas elementales, donde una secuencia de sucesos desde el nivel fundamental produce modificaciones incontrolables y desconocidas a nivel macroscópico (Gell-Mann, 1996).

El peso del individuo: Si el individuo pesa más de un valor crítico de peso (***Pmax***), termina la búsqueda inmediatamente. Este valor crítico se define como el peso máximo que puede alcanzar un individuo de carnívoro, con la finalidad de mantener a la población dentro de una homogeneidad corporal acorde con la realidad.

Eficiencia de caza: Si el individuo tuvo la suerte de encontrar una presa y tiene un peso menor al máximo definido (pasos 1 y 2), entonces el próximo paso es el de la eficiencia en la caza. Esta se determina a través de un parámetro llamado probabilidad de éxito (*Pex*). Cuando un individuo de carnívoro se encuentra en la misma posición de una presa, la captura de ésta depende de este parámetro y un número aleatorio. La cantidad de intentos de caza para cada individuo en cada paso de tiempo depende de la cantidad de individuos de presa que se encuentren en la misma posición.

El nivel de satisfacción de un individuo: Este concepto se refiere a la cantidad máxima de alimento que un individuo puede ingerir en un día. En el modelo se define una variable llamada “la caja”. Cada vez que un carnívoro caza exitosamente a una presa, el valor de la caja se modifica de tal manera que ésta aumenta en función del peso de la presa. Una vez que la caja alcanza un nivel máximo, definido como constante en el modelo, el individuo carnívoro automáticamente detiene la búsqueda de alimento, en otras palabras el carnívoro está satisfecho. Definido de esta manera, un carnívoro puede ingerir como máximo tres presas en un día, lo cual equivale, según el peso de las presas, a ingerir 4,8 unidades de masa como máximo. Cabe señalar que no toda la masa de la presa es traspasada al carnívoro. La asimilación energética por parte del carnívoro depende de un parámetro de asimilación, definida para este caso como *As* (**Cuadro 1**).

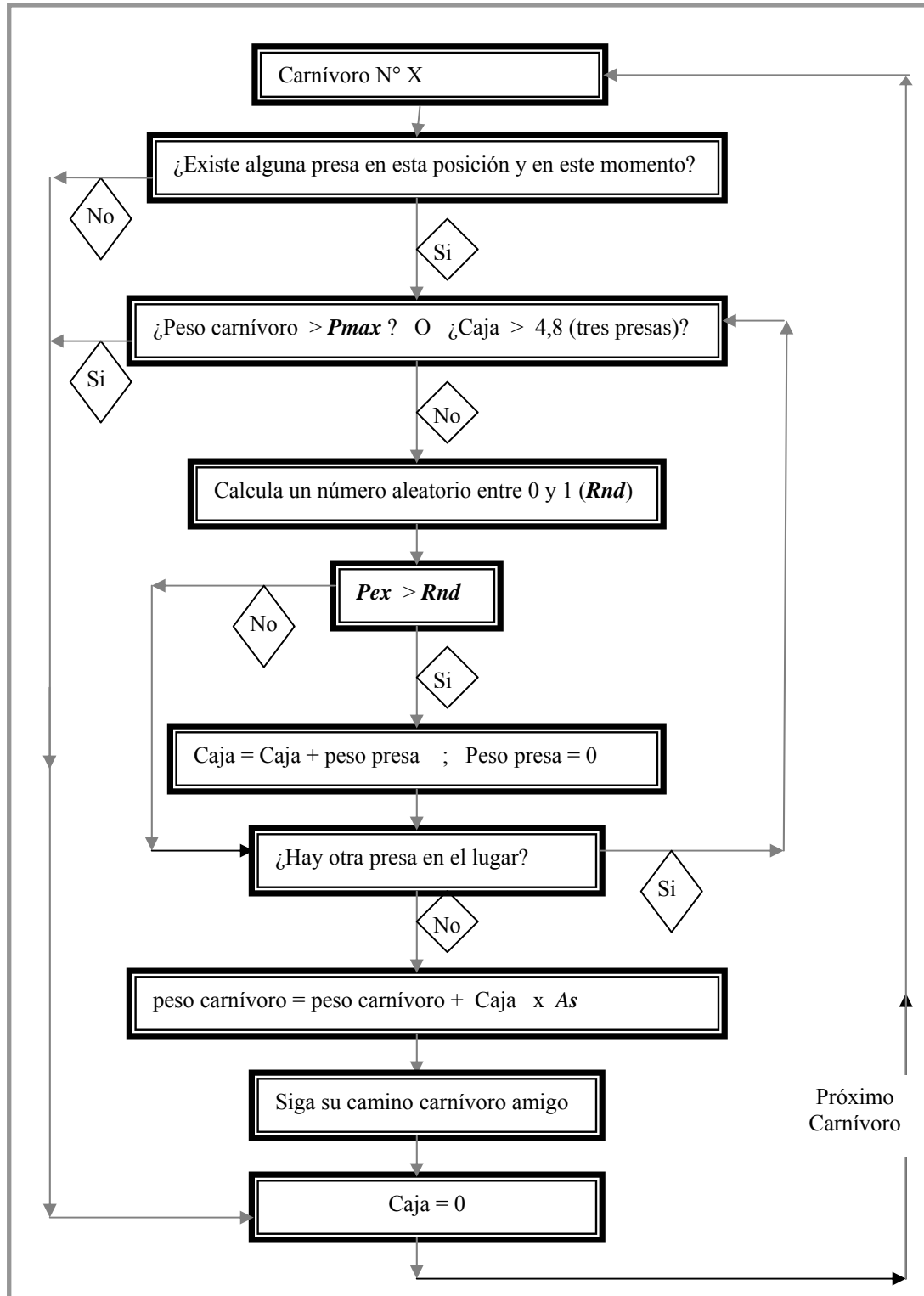


Figura 4: Estructura del algoritmo de alimentación de carnívoros.

1.2.2.-Excreción de carnívoro. La variable individual más importante es el peso de los individuos de carnívoro. La muerte y la reproducción son fenómenos dependientes del peso, por ende la dinámica de la población depende principalmente de esta variable. Por ello el concepto de excreción toma suma importancia. Cada individuo, a través de una constante de excreción diaria (Ec. 3), pierde peso y aumenta su probabilidad de morir. La relación alimentación-excreción mantiene viable al individuo en el tiempo, según los algoritmos propuestos. Pero es preciso señalar que la viabilidad del individuo no determina cual es la persistencia de la población. La muerte o reproducción de éste son simplemente factores sumamente influyentes en la determinación del efecto a nivel poblacional de los procesos originados en otro nivel del sistema, ya sea presas o sustrato.

$$Pc_{(t+1)} = Pc_{(t)} - ex \quad ; \quad \text{Ec. 3}$$

Donde

Pc: Peso de carnívoro
ex: Taza de excreción diaria
t: Tiempo en días

2.-Movimiento

2.1.-Movimiento de presas.

La dinámica espacial de presas se determina según una probabilidad de movimiento (**pm**) la cual es dependiente del nivel de sustrato y de la capacidad de carga (K) y se calcula de la siguiente manera (Figura 5).

$$pm = 1 - Su_{(i,j)} / k \quad \in \quad [0 -1] \quad ; \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde

Pm: Probabilidad de movimiento

Su_(i,j) : Nivel de sustrato en la celda **i** , **j**

K: Capacidad de carga

Dicha probabilidad es inversa a la probabilidad de alimentarse (**Pal**). Por lo tanto, a mayor cantidad de sustrato, mayor es la probabilidad de alimentarse y menor es la probabilidad de moverse (ver algoritmo de alimentación).

Posteriormente, si la probabilidad de movimiento es mayor a un número aleatorio el individuo se desplaza y elige aleatoriamente uno de los ocho vecinos más próximos, simulando con esta estructura un paseo al azar “random walk” (Figura 5).

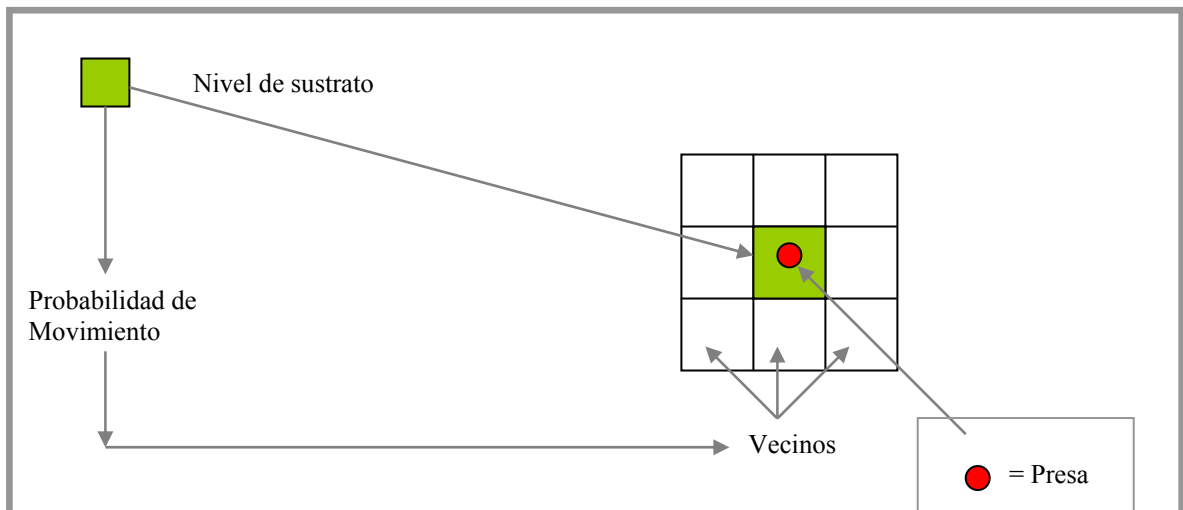


Figura 5: Esquema de la probabilidad de movimiento de las presas en el modelo. Cada individuo modificará su posición de acuerdo a una probabilidad de movimiento, dependiente del nivel de sustrato, en donde la elección del próximo sitio se realiza de manera aleatoria.

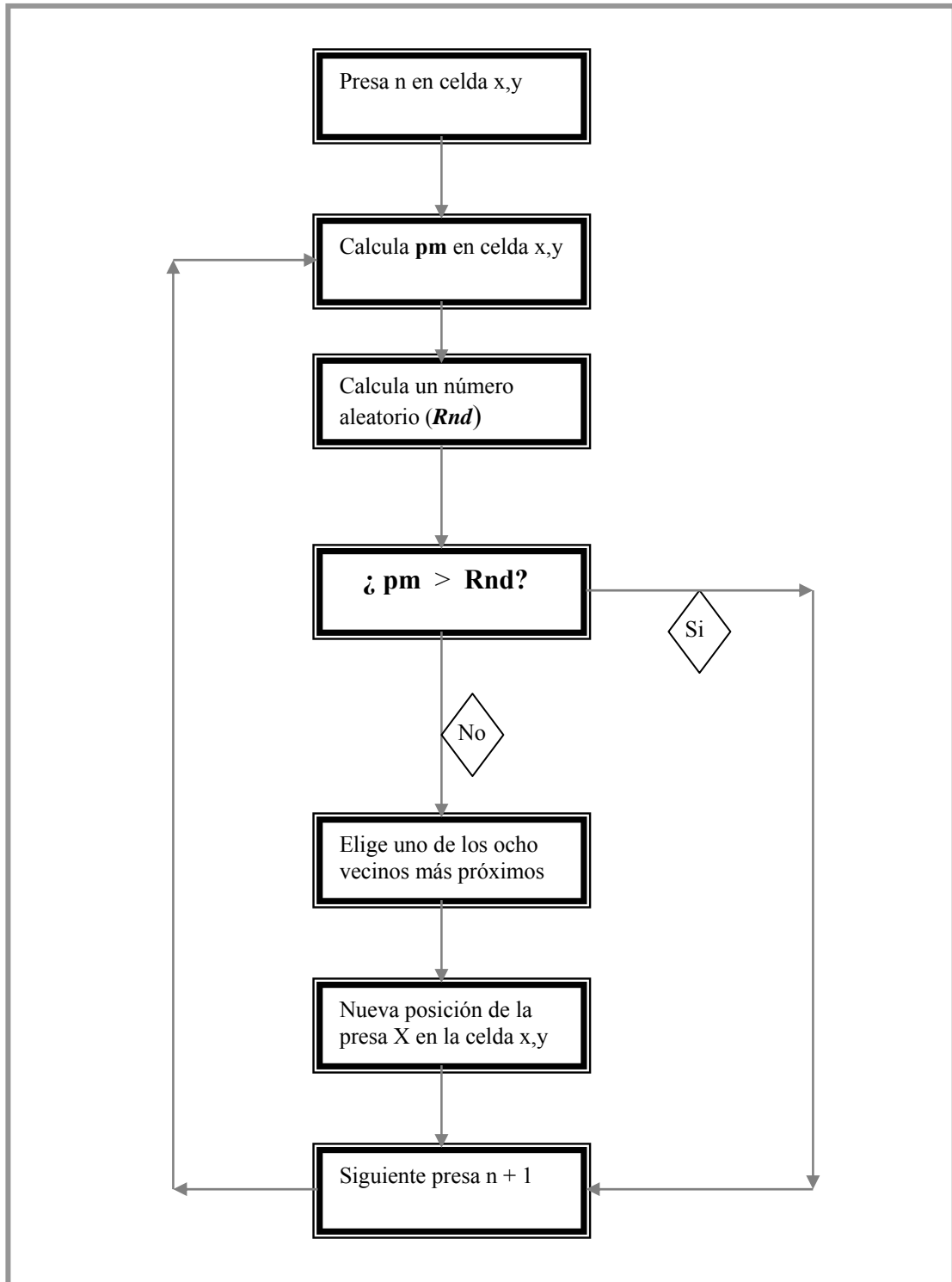


Figura 6: Estructura del algoritmo de movimiento de presas.

2.2.-Movimiento de carnívoros.

La estructura del algoritmo de movimiento por parte de los carnívoros es simple y obedece a un movimiento aleatorio, en donde un organismo, en cada mínimo intervalo de tiempo (día), modifica su posición en el espacio. Esta determinación se encuentra sujeta a las condiciones del medio en el cual se encuentra y a las características propias de peso, esto es: si el carnívoro se alimentó de una presa entonces mantiene su actual posición en el próximo día, de lo contrario se moviliza, por lo que existe una relación directa entre el algoritmo de alimentación y el de movimiento. Cuanto se movilice dependerá del peso que tenga en ese instante de tiempo. Si su peso es cercano al umbral de muerte, éste intensificará la búsqueda de alimento y se desplazará distancias mayores.

Este fenómeno puede ser visto de dos maneras: una es que el individuo al pesar menos tenga menos energía y su movimiento sea menor. La otra es que al tener menos ingesta su instinto puede determinar que intensifique su búsqueda y recorra mayores distancias en igual tiempo. De todas formas es un fenómeno mucho más complejo que el simulado, pero se eligió una intensificación de la búsqueda a menor peso, debido a que existe evidencia de que los carnívoros se desplazan grandes distancias en periodos de estrés ambiental, como se dijo en la revisión bibliográfica.

La estructura del algoritmo es la siguiente: El programa calcula un índice de nutrición (**IN**), el cual indica que estado nutricional de cada individuo en cada estado de tiempo, y depende del peso mínimo de sobrevivencia (**pm**) y del peso actual del individuo. Valores cercanos a cero indican un elevado nivel de nutrición (Ec. 5).

$$\mathbf{IN = (1.45 - (pa / pm)) \in [0 - 0.45]} \quad \mathbf{Ec. 5}$$

Donde:

IN: Índice Nutricional

pa: Peso actual del individuo

pm: peso mínimo de sobrevivencia

Una vez obtenido el índice nutricional se calcula una función de movimiento conforme al valor obtenido en el paso anterior. Definida en el programa, esta función solo calcula valores enteros entre uno y cinco (Ec.6).

$$FM = 1 + IN * 11.11111 \quad \in [1 - 5] \quad ; \quad Ec. 6$$

Donde:

FM: Función de Movimiento

IN: Índice Nutricional

Esta estructura determina cual es el alcance máximo del carnívoro dependiendo del peso que tenga, pero no establece la dirección del movimiento. Para eso es necesario definir un movimiento en ambos ejes, el cual tiene una estructura aleatoria y define el lugar exacto del individuo en el siguiente paso de tiempo (Ec. 7 y 8).

$$MX = Rnd * (FM * 2) - FM \quad ; \quad \in [-FM - FM] \quad ; \quad Ec. 7$$

$$MY = Rnd * (FM * 2) - FM \quad ; \quad \in [-FM - FM] \quad ; \quad Ec. 8$$

Donde:

MX: Movimiento en el eje X

MY: Movimiento en el eje Y

FM: Función de Movimiento

Rnd: Número aleatorio entre 0 y 1

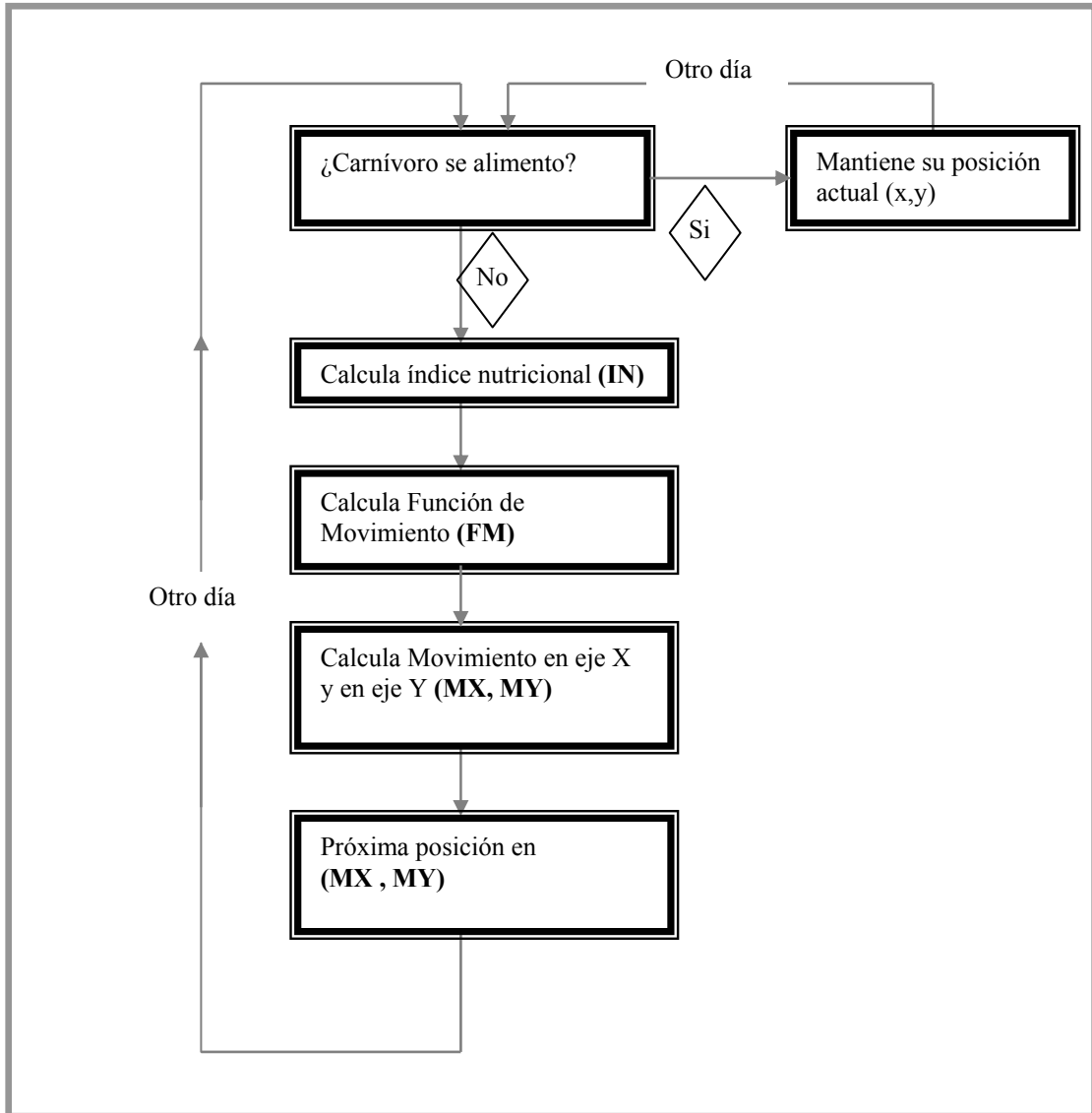


Figura 7: Estructura del algoritmo de movimiento de carnívoro.

3.-Mortalidad

3.1.-Mortalidad de presas

Las presas mantienen una estructura muy simple en todo su comportamiento. La muerte de éstas no escapa a ello. Así, cada individuo presa, al momento de dar a luz a una cría, muere y es eliminada de la población. Con esta estructura se mantiene al sistema lejos de la sobrepoblación. Por otra parte, cada vez que un carnívoro caza exitosamente una presa esta, lógicamente, muere y es eliminada del sistema. Por lo tanto, la mortalidad de las presas aparece en dos momentos del periodo temporal: día (reproducción) y año (depredación).

3.2.- Mortalidad de carnívoros.

Cada individuo carnívoro es eliminado según el peso que este tenga. El algoritmo muerte se produce dentro del ciclo mensual. Es decir, una vez al mes el sistema pregunta a cada individuo cual es su peso, si el individuo tiene un peso inferior a un parámetro llamado peso mínimo de sobrevivencia (pm) el organismo muere y es eliminado del sistema.

4.-Reproducción.

Los algoritmos de reproducción se activan una vez al año para las presas y carnívoros por igual. Son simples y directos. Esta simplicidad se expresa en el hecho de que la reproducción no depende del encuentro entre machos y hembras, es decir, no existe el sexo en el modelo. Esta abstracción puede parecer absurda, pero estudiado desde el punto de vista teórico no lo es. Al ser un modelo teórico, las especies definidas no existen en ningún otro lugar, solo existen en el modelo y su conducta depende simplemente del código computacional creado. Por otra parte, al ser un modelo ecológico, lo importante es el fenómeno propiamente tal, en este caso la reproducción, y su relación con las otras partes del sistema.

4.1.-Reproducción de Presas

La reproducción depende principalmente de la cantidad promedio de alimento disponible para la temporada en las inmediaciones de la presa, es decir, en los ocho vecinos más próximos (Figura 8; Ec. 9). La relación entre el sustrato promedio y nacimientos se expresa a través de una función que calcula la relación entre el promedio de sustrato presente en los ocho vecinos más próximos a la presa y una constante de reproducción (*Crep*; Ec. 10). La función entrega valores entre 0 y 5; esto quiere decir que cada presa puede tener una cantidad de crías dentro de este rango. Con esta estructura se obtiene una población ambientalmente auto sustentable, ya que con un buen nivel de alimento cada “madre” responde aumentando el número de crías en el próximo periodo. Cada vez que una presa da a luz a otro(s) individuo, la “madre” muere y es eliminada del sistema (algoritmo de mortalidad) (Figura 9).

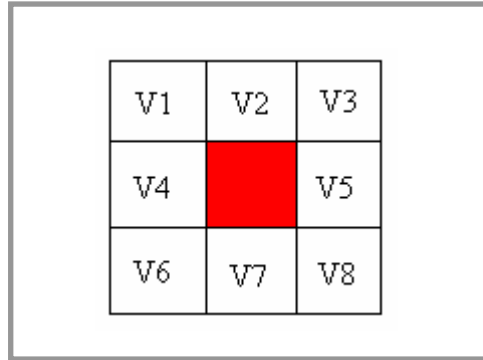


Figura 8: Píxeles vecinos a una presa

$$PSu = \left(\sum_{i=1}^8 (SuV_i) \right) / 8 \quad \in \quad [0, K] \quad ; \quad \text{Ec. 9}$$

$$NU = PSu / Crep \quad \in \quad [0, 5] \quad ; \quad \text{Ec. 10}$$

Donde

SuV_i: Sustrato en la celda vecina i

PSu: Promedio de sustrato en los ocho vecinos mas próximos

Crep: Constante de reproducción

NU: Número de crías por presa

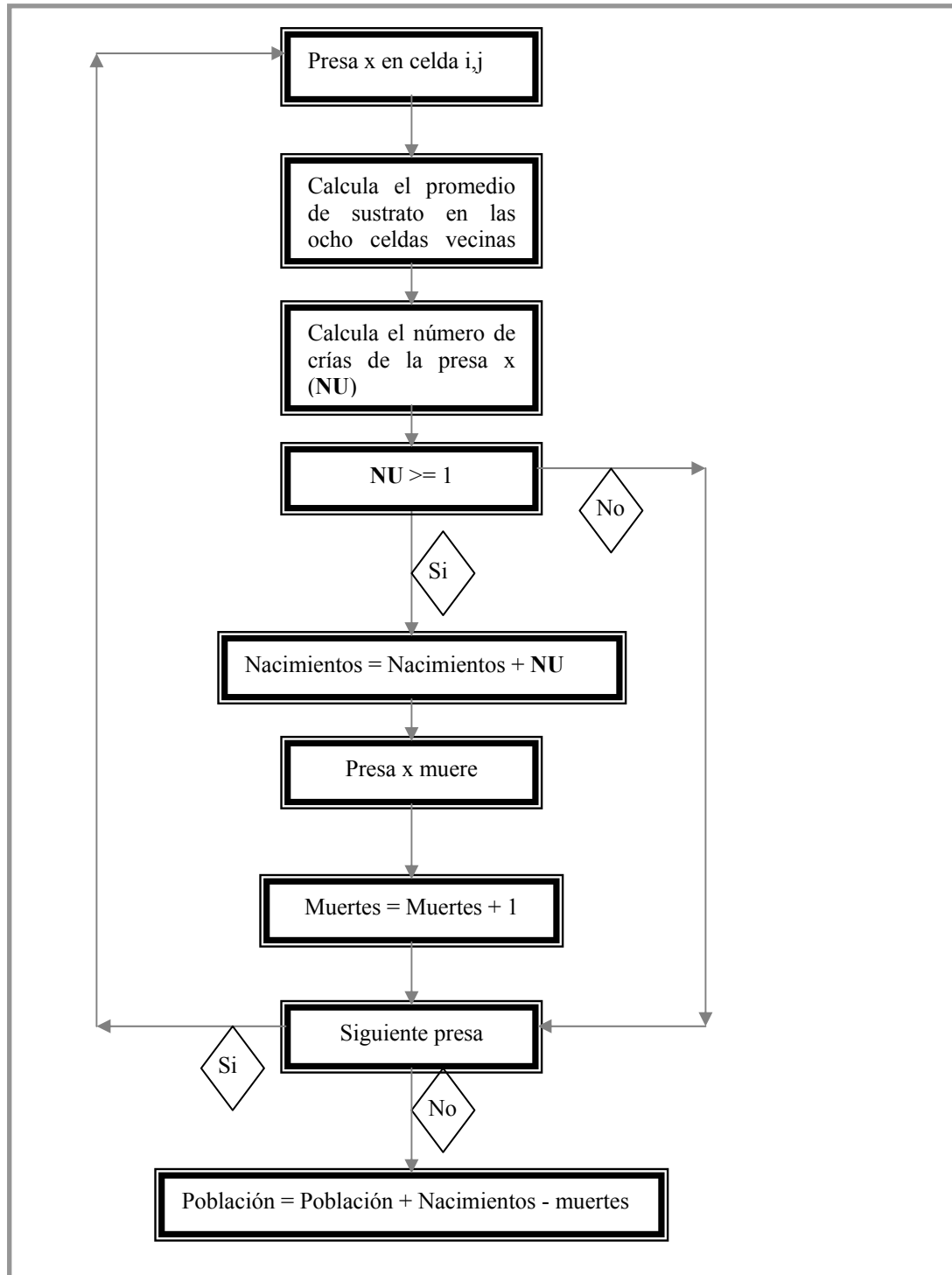


Figura 9: Estructura del algoritmo de reproducción de presas.

4.2.-Reproducción de carnívoros

La reproducción de carnívoros depende del peso que éstos tengan en el periodo de reproducción (año). Todos los individuos que tengan un peso superior a una constante de reproducción (Ω), son posibles candidatos a dar a luz a una cría. Cada uno de estos “candidatos” tiene la misma probabilidad de reproducirse (*Prrep*), pero en definitiva, el peso de un individuo no define la reproducción, solo selecciona a un conjunto de individuos con posibilidad de dar a luz a una cría.

Cada individuo que da a luz, pierde una cantidad constante de su peso (\pounds), con lo cual se busca representar el gasto energético que conlleva la crianza de nuevos individuos por parte de las “madres”. Estos nuevos individuos “juveniles” ingresan a la matriz poblacional con un peso cercano al mínimo de sobrevivencia *pm* (muerte de carnívoros), por ende su sobrevivencia futura depende de la suerte que tenga en cazar una presa en los próximos pasos de tiempo (Figura 10).

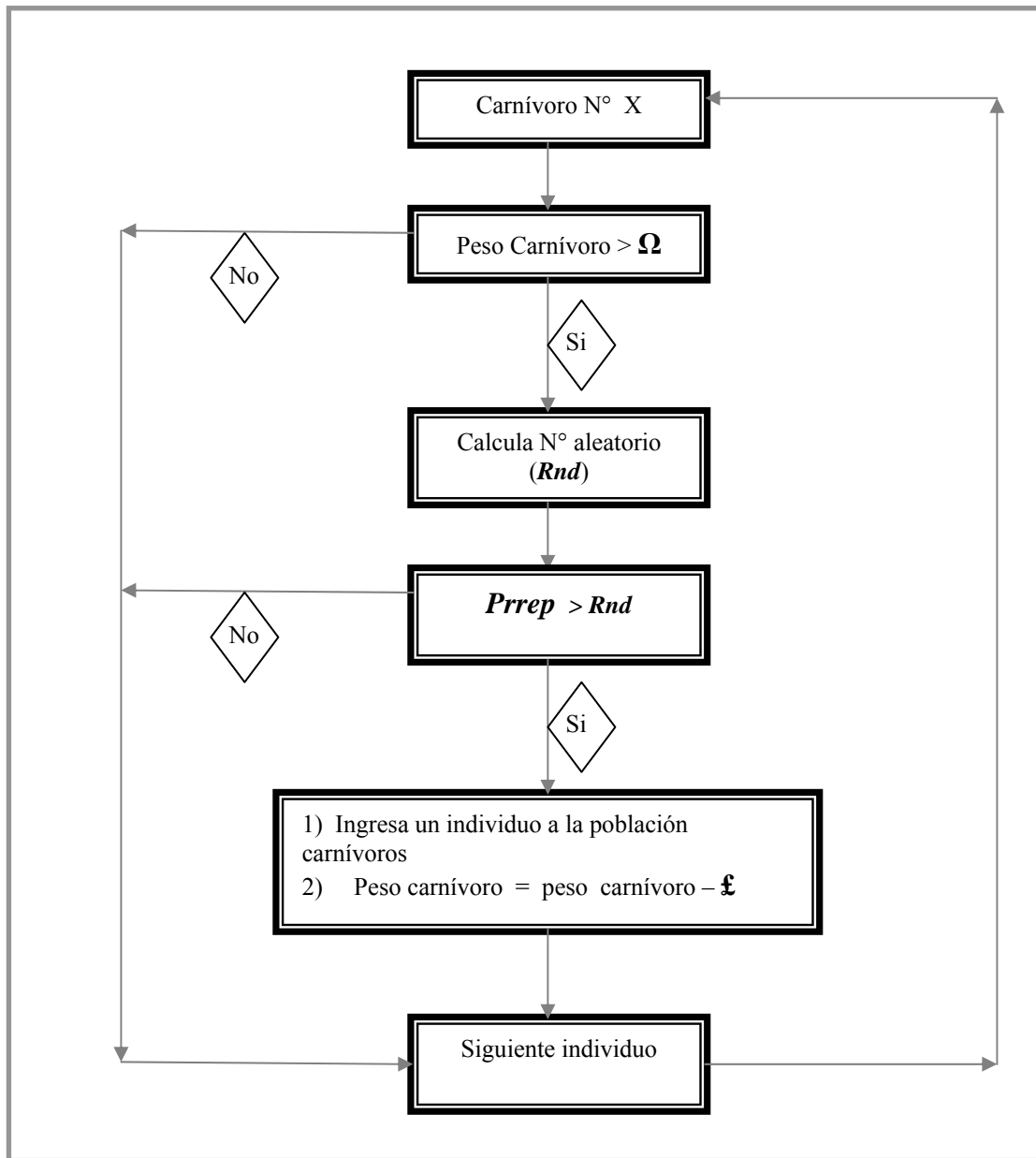


Figura 10: Estructura del algoritmo de reproducción de carnívoros.

5.-Sustrato

El sustrato varía anualmente para cada unidad mínima areal según una ecuación lineal, compuesta por una constante de calidad de hábitat y el sustrato existente al final de una temporada (Ec. 11), dada una capacidad de carga en el sistema (**K**). Cada unidad mínima areal del paisaje simulado (píxel), varía en diferente medida según las condiciones de hábitat propuestas. Es decir, una buena calidad de hábitat representará un mayor potencial de crecimiento de sustrato (Figura 11).

$$Su_{(T+1)} = Ccal + Su_{(T)} \quad \in [0, K] \quad ; \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde:

T: tiempo en años $\in [T_{\text{inicial}}, T_{\text{final}}]$

Su: Nivel de sustrato

Ccal: Constante de calidad

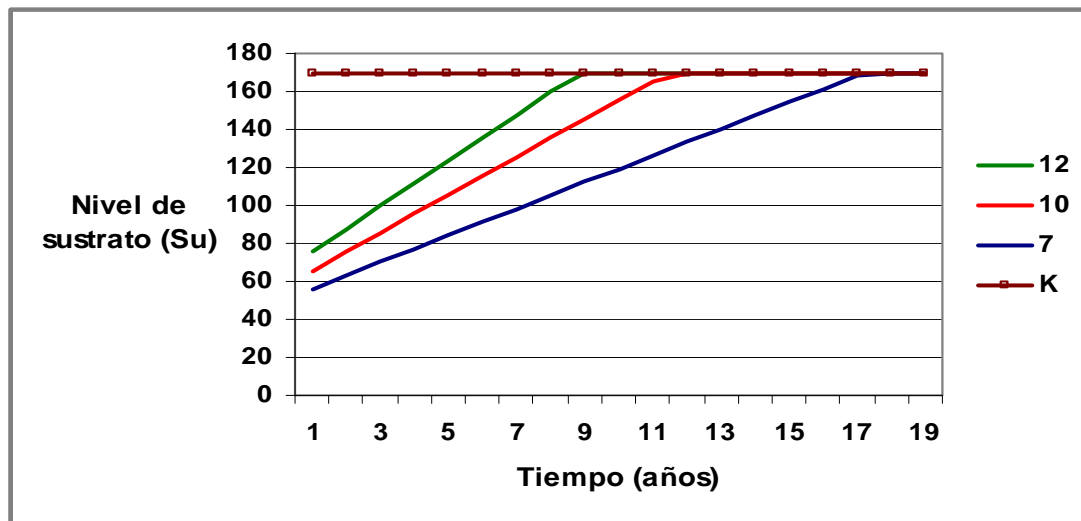


Figura 11: Nivel de sustrato con diferentes constantes de calidad (7; 10; 12) para una unidad areal, en un espacio de tiempo y sin variabilidad ambiental y/o consumo de herbívoros (presas). **K**: capacidad de carga.

Prueba, parámetros y condiciones iniciales

Luego de que todos los algoritmos fueron creados, el modelo fue sometido a una prueba de estabilidad. Esta prueba se realizó con el fin de ajustar los parámetros, constantes y condiciones iniciales del modelo en general. Cabe señalar que los valores obtenidos fueron ajustados tomando en consideración la propia evolución del sistema, con lo cual no es posible encontrar similitud alguna entre los parámetros ingresados al sistema y los parámetros de comunidades reales.

Las condiciones iniciales del sistema fueron: cantidad de individuos de presa y carnívoro y cantidad inicial de sustrato vegetal para cada celda. La relación número de presas- depredador mantiene una proporción lógica donde existe mayor número de presas por individuo carnívoro. Con los parámetros ajustados y con las poblaciones ingresadas, se iniciaron las pruebas de estabilidad, con lo cual se obtuvieron valores promedios de sustrato por unidad areal las que luego fueron usadas como condiciones iniciales de nivel de sustrato para las diferentes calidades de hábitat, es decir cada calidad de hábitat (Ccal) tiene un valor promedio de sustrato inicial (**SuI**). Los parámetros obtenidos se muestran a continuación en el cuadro 1.

Parámetro	Definición	Valor	Algoritmo	Comentario
K	Capacidad de carga del nivel sustrato	150	Sustrato	Define el nivel máximo de sustrato
Ccal	Constante de calidad	7 o 10 o 12	Sustrato	Define el valor de ingreso de sustrato en una temporada
Su	Nivel de sustrato	0 - 150	Sustrato	Define el nivel de sustrato en cada tiempo
SuI	Nivel de sustrato inicial	56 o 65 o 75	Sustrato	Define el nivel de sustrato al comienzo de la simulación
Cons	Consumo presa	3	Alimentación pesas	Define el consumo de sustrato por parte de una presa
Pal	Probabilidad de alimentación presas	0 - 1	Alimentación pesas	Determina la probabilidad que tiene una presa de alimentarse en una celda en una unidad de tiempo
Pm	Probabilidad de movimiento presas	0 - 1	Movimiento pesas	Determina la probabilidad que tiene una presa de moverse de una celda a otra en una unidad de tiempo
Crep	Constante de reproducción presas	40	Reproducción presas	Constante utilizada para determinar el número de crías de cada presa
PSu	Promedio de sustrato de celdas vecinas	0 - 150	Reproducción presas	Valor utilizado para determinar el número de crías de cada presa
NU	Número de crías por presa	0 - 5	Reproducción presas	Determina el número de crías de presa
Ω	Constante de reproducción carnívoros	14.5	Reproducción carnívoro	Determina el peso con el cual se activa el algoritmo de reproducción de carnívoro
Prrep	Probabilidad de reproducción carnívoros	0.8	Reproducción carnívoro	Determina la probabilidad que tiene un carnívoro de reproducirse
£	Constante de pérdida de peso reproductivo carnívoro	2	Reproducción carnívoro	Peso perdido por un carnívoro luego de dar a luz
Pa	Peso actual de un individuo carnívoro	12-17	Reproducción carnívoro	Define el peso de un carnívoro en un instante de tiempo
IN	Índice nutricional de carnívoros	0 - 4,5	Movimiento carnívoro	Determina el nivel nutricional de un individuo de carnívoro
Pm	Peso mínimo de sobrevivencia de un carnívoro	12	Movimiento carnívoro	Define el peso mínimo de sobrevivencia de un carnívoro
FM	Función de movimiento carnívoros	0 - 5	Movimiento carnívoro	Determina la cantidad de píxeles que se moviliza un carnívoro en una unidad de tiempo
Pex	Probabilidad de éxito carnívoros	0 - 1	Alimentación carnívoro	Define la probabilidad de atrapar una presa por parte de un carnívoro
Pmax	Peso máximo de carnívoro	17	Alimentación carnívoro	Define el peso máximo que puede tener un carnívoro
As	Asimilación energética de carnívoros	0.31	Alimentación carnívoro	Determina el porcentaje de energía asimilada por un carnívoro
Exc	Constante de excreción carnívoros	0.0008	Alimentación carnívoro	Define el porcentaje de energía eliminada en cada unidad de tiempo por un carnívoro

Cuadro 1: Parámetros utilizados en el modelo **Eco-lógica 1.0**. Cada valor se obtuvo luego de la prueba de estabilización a la que fue sometida el modelo.

Experimentos

Una vez que se crearon los algoritmos correspondientes y que el modelo entregó datos suficientemente consistentes, se realizaron 3 diferentes experimentos para determinar el efecto del entorno y la variabilidad ambiental sobre la población de carnívoros. Dichos experimentos mantienen la estructura de los algoritmos creados para el modelo, pero con dos diferencias: 1) se modificó espacialmente el ingreso de sustrato para simular el interior y exterior de un área protegida, a través de la modificación de la constante de calidad (Ccal); y 2) se ingresó un factor de variabilidad ambiental al algoritmo de sustrato (Ec. 11).

Modificación espacial de la constante de calidad (Ccal)

Como se mencionó anteriormente el modelo permite simular el interior y el exterior de un área protegida. Ahora bien, para cada experimento se crearon nueve escenarios en donde se combinan tres diferentes condiciones de hábitat para el exterior y el interior del área. Esto se realiza modificando la constante de calidad (potencial de crecimiento) en la ecuación de ingreso de sustrato anual (Ec. 11) en el exterior y en el interior. Es decir, tenemos tres niveles de ingreso anual de sustrato: un nivel alto (buenas condiciones B), medio (condiciones medias Me) y bajo (malas condiciones Ma) (Figura 12).

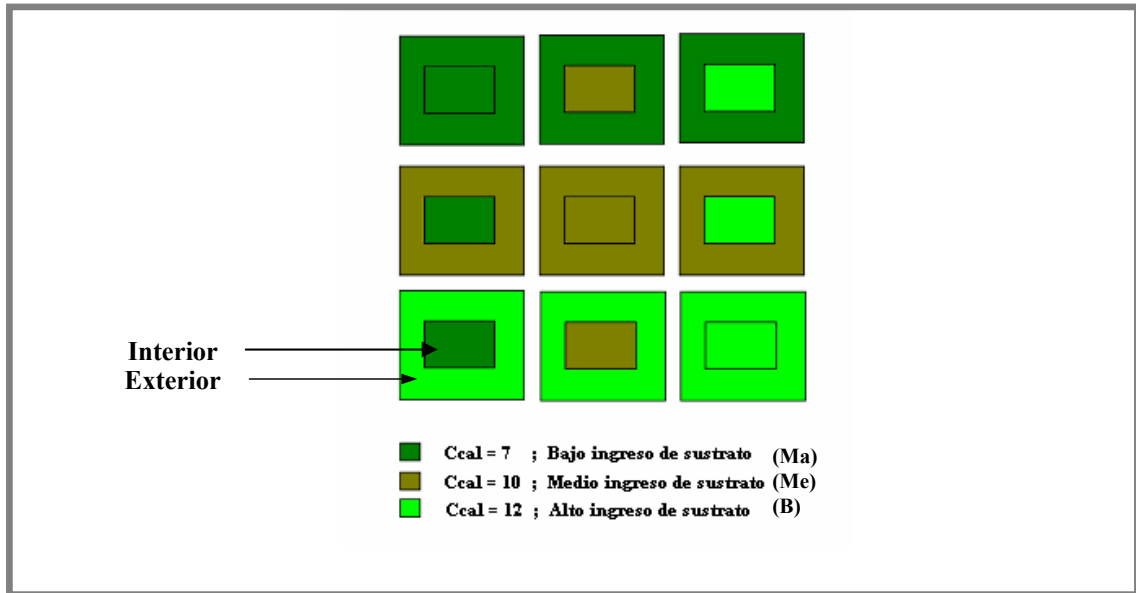


Figura 12: Escenarios simulados para el interior y el exterior de un área silvestre protegida con tres niveles de la constante de calidad (Ccal) que representan condiciones malas (Ma), medias (Me) y buenas (B) de hábitat.

Ingreso de variabilidad en el algoritmo sustrato

La diferencia entre los tres experimentos radica en la estructura de la variabilidad ambiental. Matemáticamente el factor de variabilidad (VA) es una secuencia de valores con una media cercana a 1 y tres diferentes desviaciones estándar (S) dependiendo de la variabilidad propuesta para los tres diferentes experimentos. La obtención de las tres diferentes secuencias se realizó a través de diferentes fuentes. El experimento 1 tiene una secuencia de datos con nula variabilidad ambiental, es decir tiene una media igual a uno y una desviación estándar igual a cero. El segundo experimento tiene una secuencia de valores con media cercana a 1 y desviación estándar igual a 0.3, esta secuencia se obtuvo con una función normal. El tercer experimento tiene una secuencia de datos con media 1 y desviación estándar 0.6. Esta serie se obtuvo con datos pluviométricos de la estación La Serena, los cuales fueron normalizados para obtener un valor con media igual a 1. Esta normalización determinó una desviación estándar cercana a 0.6 para dichos datos. En este

punto es importante incluir el concepto de variabilidad acumulada. En el experimento 1 el factor ambiental (VA) es siempre 1, por lo tanto sumando este factor en 120 años tenemos, lógicamente, 120. Para los tres experimentos la acumulación de variabilidad en 120 años da un resultado de 120, la diferencia radica en la distribución del factor de variabilidad. En el experimento 2 la distribución mantiene una forma normal, mientras que en el experimento 3 se obtiene una serie de datos reales y modificados de tal manera que se obtiene una acumulación igual a 120 pero con una distribución mucho más variable (Figura 13).

Para el tercer experimento el factor VA es un valor anual creado de una serie de datos obtenidos de eventos de precipitaciones de la zona norte, específicamente de la estación pluviométrica de La Serena. Se obtuvo un valor acumulado de precipitación para 120 años, con el cual, cada dato pluviométrico fue transformado a una variabilidad ambiental (VA) la cual es un número entre 0 y 3. Esto se realizó a través de una regla de tres que toma en cuenta el dato de precipitación en un año ($Pp(t)$) y el total de precipitación (Pp_{total}) en los 120 años, para lograr una variabilidad acumulada muy cercana a 120 (Ec. 12). Los valores más altos representan años de superávit de precipitación, el resultado acumulado de la variabilidad es también aproximado a 120 como en el experimento 1, pero la distribución de ésta es completamente diferente (véase Figura 15), de hecho la desviación estándar de la serie es aproximadamente 0.6 lo que significa el doble de variabilidad que el experimento 2.

$$VA_{(T)} = (Pp_{(T)} \times 120) / Pp_{total} \quad ; \quad \text{Ec. 12}$$

Donde

$Pp_{(T)}$: Dato de precipitación para un año **T**

Pp_{total} : Precipitación acumulada en 120 años de la serie de datos

VA: Factor de variabilidad ambiental del año **T**

Modificación del Algoritmo Sustrato

Según lo propuesto anteriormente el nivel de sustrato no solo depende de las condiciones de calidad de hábitat presentes en el área ($Ccal$), sino que es el producto entre las condiciones de calidad de hábitat (potencial de crecimiento) y la variabilidad ambiental de cada año (Ec. 13), lo cual representa el crecimiento total para cada unidad mínima areal en un año simulado.

Cabe señalar que para cada simulación la serie de variabilidad tiene un comienzo aleatorio con lo cual cada simulación tiene diferente orden, y en definitiva la aparición de condiciones positivas o negativas se modifica en cada repetición del experimento.

$$Su^{(T+1)}_{(i,j)} = \boxed{VA \times Ccal} + Su^{(T)}_{(i,j)} \in [0, K] \quad ; \quad (\text{Ec. 13})$$

↑
Potencial de
crecimiento anual de
sustrato

Donde

Ccal: Constante de calidad

Va: Factor de variabilidad

Su_(T): Nivel de sustrato al final de la temporada (año)

$$\text{Con } Ccal = \begin{cases} 7 & \text{Bajo ingreso de sustrato (Ma)} \\ 10 & \text{Medio ingreso de sustrato (Me)} \\ 12 & \text{Alto ingreso de sustrato (B)} \end{cases}$$

Con las 9 configuraciones espaciales y los tres diferentes regímenes de variabilidad ambiental, se obtuvieron un total de 27 escenarios a simular. Para cada escenario se realizaron 20 réplicas, con lo cual se tiene un total de 540 simulaciones. El tiempo utilizado por cada réplica es de 4 horas aproximadamente, dependiendo de las características de los escenarios y de los tamaños poblacionales. En total se utiliza un tiempo total aproximado de 2160 horas de procesamiento.

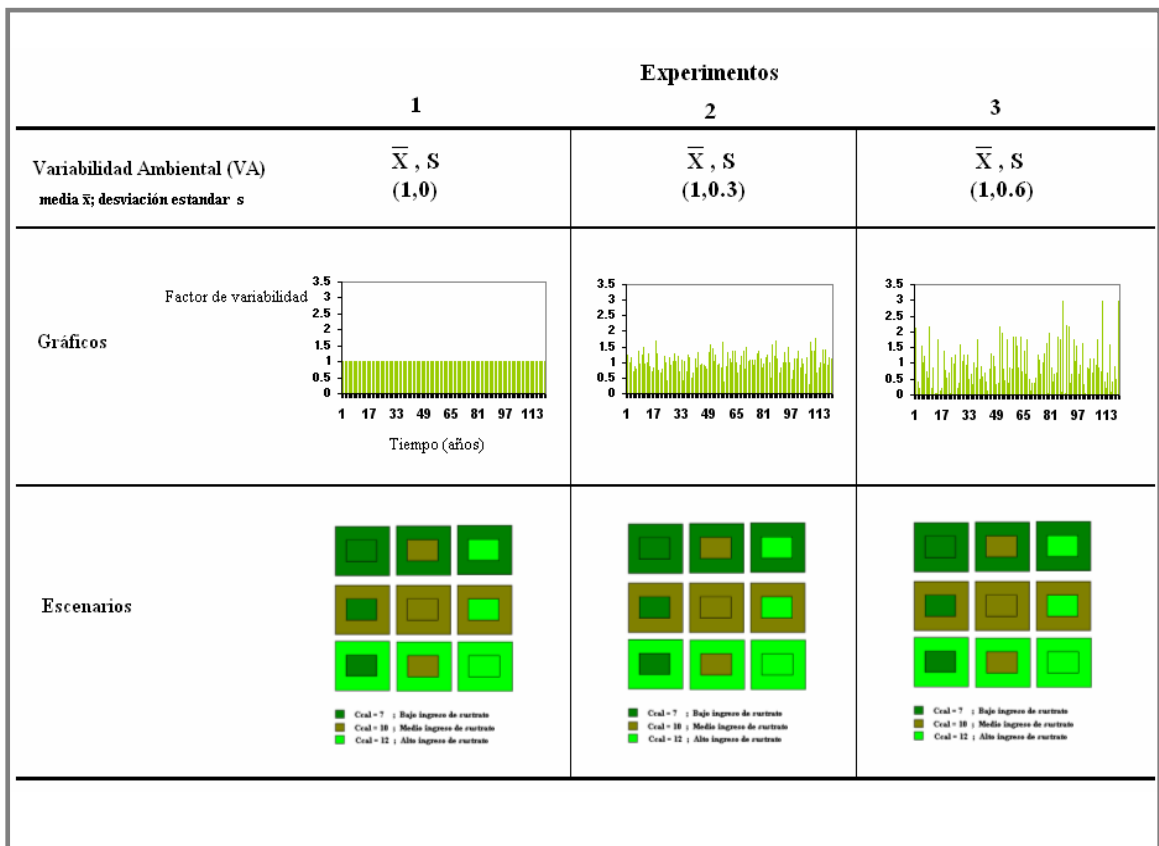


Figura 13: Variabilidad ambiental simulada para los experimentos 1, 2 y 3. Los gráficos muestran los diferentes grados de variabilidad en función a la desviación estándar. Con los tres experimentos y los 9 escenarios espaciales se obtienen 27 escenarios a simular.

Variables Respuestas

La cantidad de datos que el sistema entrega es significativa y va desde el nivel de individuo hasta los niveles poblacionales. Así, el modelo entrega el peso de todos los organismos y su posición en el espacio en cualquier instante de tiempo. Como se mencionó anteriormente, el modelo tiene un periodo de simulación de 120 años. Para eliminar el efecto de las condiciones iniciales propuestas, las variables respuestas fueron calculadas en un espacio temporal de cien años partiendo desde el año 20. Se realizaron 20 réplicas para cada uno de los 27 escenarios propuestos. Los datos son entregados en tablas de archivos Excel como se muestra en la figura 14.

La de la densidad y la persistencia de la población de carnívoros en el interior de un área protegida son los datos a determinar con respecto a los objetivos planteados en esta tesis.

Densidad Poblacional

La variable más importante con respecto a la pregunta de interés es la densidad poblacional dentro del área silvestre protegida al finalizar un ciclo anual. Ésta se calcula realizando un censo anual a la población en el interior del área protegida y dividiendo el número de individuos por el total de unidades mínimas areales que representan dicho interior (10.000 píxeles). Con cada dato anual se obtiene una curva que representa, en 120 años, la dinámica de la población de carnívoros. Con las 20 réplicas ($n = 20$) se obtuvo una dinámica promedio para cada uno de los 27 escenarios simulados. En total, se registraron 27 dinámicas promedio de la densidad de una población de carnívoros en el interior de un área protegida (ver resultados de los experimentos).

Con cada réplica de la dinámica se obtuvo un promedio de la densidad poblacional. Para cada escenario se obtuvo la media del promedio de la densidad poblacional en 20 repeticiones.

Persistencia de la población

A cada escenario simulado se le calculó una probabilidad de persistencia, la cual se definió como la razón entre la cantidad de repeticiones que mantuvieron poblaciones de carnívoros en el interior del área protegida al final del periodo simulado y el total de simulaciones hechas.

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet with the following data:

	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
3	movimiento de zorros	Car. dentro	Car. Fuera	nacimientos dentro	nacimientos fuera	muerdes dentro	muerdes fuera	dens dentro	dens fuera		
4	196.567	21	75	0	5	4	5	0.0021	0.0025		
5	198.942	20	76	2	6	2	6	0.002	0.002533333	1	
6	201.92929	24	97	8	23	0	6	0.0024	0.002333333	4	
7	202.49653	41	123	16	34	2	5	0.0041	0.0041	-3	
8	200.16807	44	150	13	41	11	13	0.0044	0.005	-1	
9	196.37021	42	163	6	36	6	25	0.0042	0.005433333	2	
10	196.12222	52	147	6	25	10	27	0.0052	0.0049	-14	
11	195.5773	47	132	5	13	7	31	0.0047	0.0044	3	
12	195.22536	44	115	2	7	9	20	0.0044	0.003833333	-4	
13	196.60696	36	118	5	9	9	10	0.0036	0.003933333	4	
14	196.84909	46	117	8	15	4	10	0.0046	0.0039	-6	
15	196.56779	50	146	12	31	1	7	0.005	0.004933333	7	
16	195.04549	63	165	15	32	6	11	0.0063	0.0055	-4	
17	196.76632	58	198	11	45	5	23	0.0058	0.0066	11	
18	199.21018	59	200	6	37	10	30	0.0059	0.006666667	-5	
19	196.96596	49	196	5	24	13	30	0.0049	0.006533333	2	
20	199.15567	55	173	4	16	8	29	0.0055	0.005766667	-10	
21	197.38278	44	177	7	15	4	25	0.0044	0.0059	14	
22	192.98457	52	165	8	13	2	23	0.0052	0.0055	-2	
23	194.97627	62	168	11	23	7	14	0.0062	0.0059	-6	
24	197.30435	66	179	8	27	8	12	0.0066	0.005966667	-4	
25	200.71681	70	199	9	36	4	17	0.007	0.006633333	1	
26	201.23884	58	220	4	40	15	20	0.0058	0.007333333	1	
27	202.05652	63	222	7	34	7	27	0.0063	0.0074	-5	
28	200.10091	68	211	4	21	9	22	0.0068	0.007033333	-10	
29	200.09567	59	189	5	13	10	39	0.0059	0.0063	4	
30	200.40716	69	175	10	15	5	24	0.0069	0.005833333	-5	
31	199.88345	60	185	10	24	9	24	0.006	0.006166667	10	
32	200.34452	67	185	12	23	11	17	0.0067	0.006166667	-6	
33	202.69667	70	199	11	29	7	16	0.007	0.006633333	1	
34	202.68385	72	216	9	41	8	23	0.0072	0.0072	-1	
35	199.7652	68	232	5	31	4	20	0.0068	0.007333333	5	
36	198.24629	74	235	9	34	6	28	0.0074	0.007833333	-3	
37	197.36765	62	248	6	32	10	27	0.0062	0.008266667	8	
38	196.77554	60	224	6	19	8	43	0.006	0.007466667	0	

Figura 14: Datos de salida de una simulación. Los datos son entregados en formato Excel.

RESULTADOS

Comportamiento general del Modelo

Estos resultados fueron obtenidos posteriormente a la prueba de estabilidad a la que fue sometido el modelo y mantienen una configuración espacial homogénea sin escenarios propuestos para los experimentos. Estos resultados son complementarios a los resultados que se obtuvieron en los experimentos y no se encuentran dentro de los objetivos formales de este trabajo.

Capacidad de Carga

El sustrato se relaciona con el consumo de éste por parte de las presas, lo cual depende a su vez de los algoritmos de alimentación, movimiento, reproducción y muerte de éstas. Estos algoritmos tienen un alto grado de aleatoriedad, por ende no es posible saber cual será el valor del consumo hasta que termine la temporada. Por lo tanto, la linealidad de la ecuación propuesta para el ingreso de sustrato (Ec. 11) se perdió una vez que el sistema mantenía una población de presas, ya que éstas disminuyeron el sustrato presente en cada unidad mínima areal a través de la obtención de recursos. Una vez que el modelo se acopló con las poblaciones de presa y carnívoro, la capacidad de carga teórica (K) no influyó en el sistema y se convirtió en una propiedad emergente de las relaciones de sustrato, presa y carnívoro, es decir es una variable dependiente del sistema por completo. Así, la dinámica del sustrato comenzó a oscilar en niveles dependientes a las relaciones entre los agentes participantes en cada unidad de tiempo y espacio (Figuras 15).

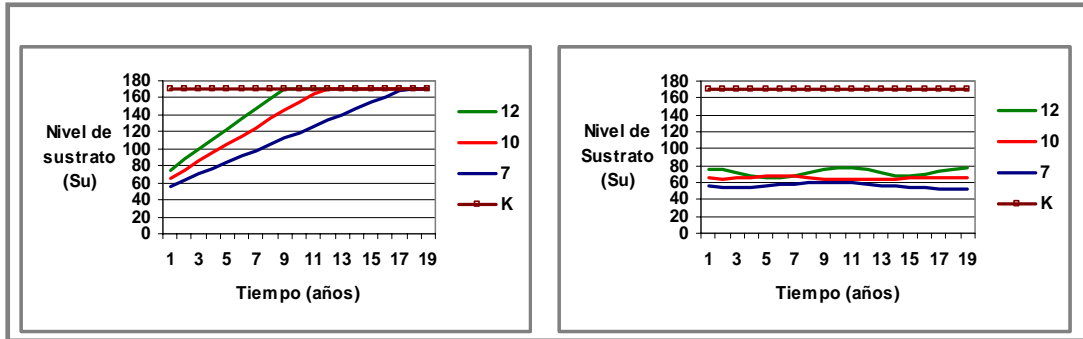


Figura 15: Gráficos de la dinámica del sustrato. El gráfico 1 representa el nivel del sustrato con diferentes constantes de calidad (7; 10; 12) para una unidad areal, en un espacio de tiempo, sin variabilidad ambiental y sin consumo de herbívoros (presas). El gráfico 2 representa el nivel de sustrato con diferentes constantes de calidad (7; 10; 12) para una unidad areal, en un espacio de tiempo, con consumo de herbívoros (presas) y sin variabilidad ambiental. Donde **K**: capacidad de carga teórica.

Dinámica Carnívoro-Presa

Para tres diferentes niveles de la constante de calidad se obtuvieron tres diferentes dinámicas del tipo depredador-presa (Figura 16). Para el mayor potencial de crecimiento ($C_{cal} = 12$) se produjeron las mayores oscilaciones poblacionales (Figura 16, gráfico 3). Para el potencial de crecimiento $C_{cal} = 7$ la población de carnívoros se extinguió (Figura 16, gráfico 1). El valor medio propuesto para el potencial de crecimiento ($C_{cal} = 10$) mantuvo a las poblaciones muy cerca del equilibrio asintótico, es decir sin grandes oscilaciones (Figura 16, gráfico 2).

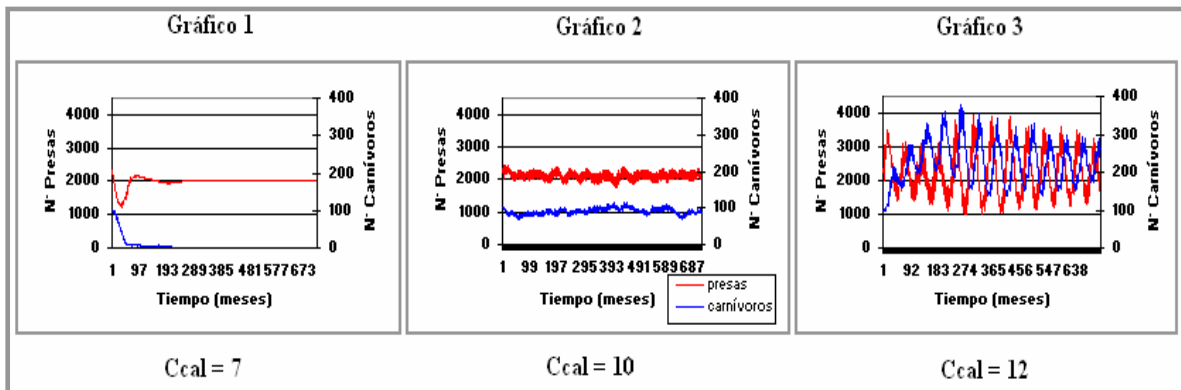


Figura 16: Gráficos de la dinámica depredador-presa para 3 diferentes constantes de calidad (C_{cal}).

Resultados de los experimentos

Dinámicas de la densidad de carnívoros en el Interior de un Area Protegida

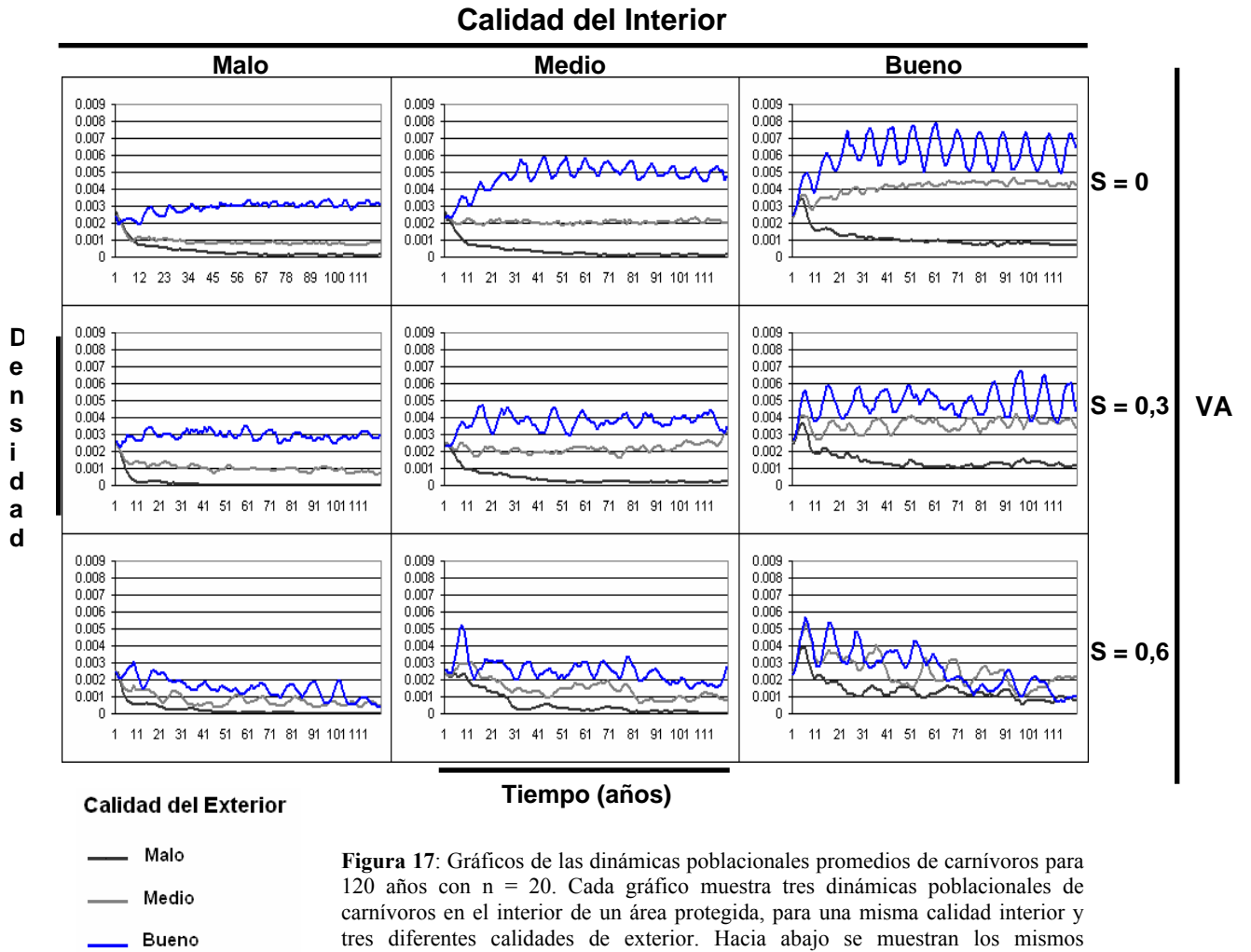
En la Figura 17 se pueden apreciar los gráficos de las dinámicas promedio ($n = 20$) de la densidad poblacional de carnívoros en el interior del área protegida. Cada gráfico contiene tres dinámicas promedio, correspondientes cada una, a un tipo de calidad de interior y tres diferentes condiciones exteriores. Hacia abajo se aprecian los mismos escenarios para diferentes condiciones de variabilidad ambiental (VA) propuestas para cada experimento.

La densidad poblacional en el interior se vio afectada de manera muy significativa por las condiciones ambientales del entorno. Los mayores niveles poblacionales se manifestaron en los escenarios que tienen un exterior con condiciones buenas y disminuyó considerablemente en los escenarios con condiciones negativas en el exterior.

Las mayores oscilaciones ocurrieron principalmente cuando las condiciones fueron positivas dentro y fuera del área (Figura 17 gráficos 3 y 6), es decir, a mayor ingreso de sustrato mayores oscilaciones poblacionales. Para las mismas condiciones interiores, pero con un exterior con condiciones medias, las oscilaciones disminuyeron considerablemente.

Para el escenario más realista, es decir Exterior Malo-Interior Bueno (Figura 17, gráficos 3, 6 y 9), se apreció una disminución de la densidad promedio de carnívoros. Con una Regresión Lineal se analizó la tendencia de la dinámica promedio de los carnívoros en los tres tipos de experimentos. El resultado fue un valor negativo de la pendiente para los tres experimentos. La Figura 18 muestra las mismas dinámicas de la Figura 17 para el escenario señalado, con sus respectivas líneas de tendencia pero con una diferencia de escala para acentuar gráficamente dicha línea. El experimento con variabilidad ambiental media ($S = 0.3$) mostró la menor disminución de la dinámica (**pendiente = $-0,93 \times 10^{-5}$**), seguido por el experimento sin variabilidad ambiental ($S = 0$) (**pendiente = $-1,15 \times 10^{-5}$**). La

mayor tendencia a la extinción se apreció en el experimento con variabilidad ambiental extrema ($S = 0.6$) (pendiente = $-1,32 \times 10^{-5}$).



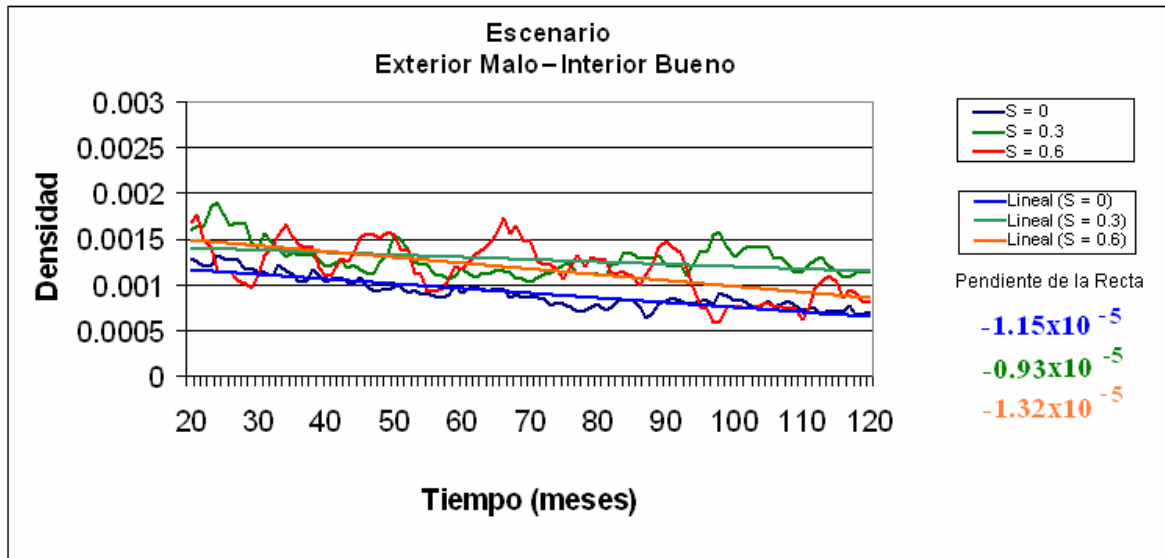
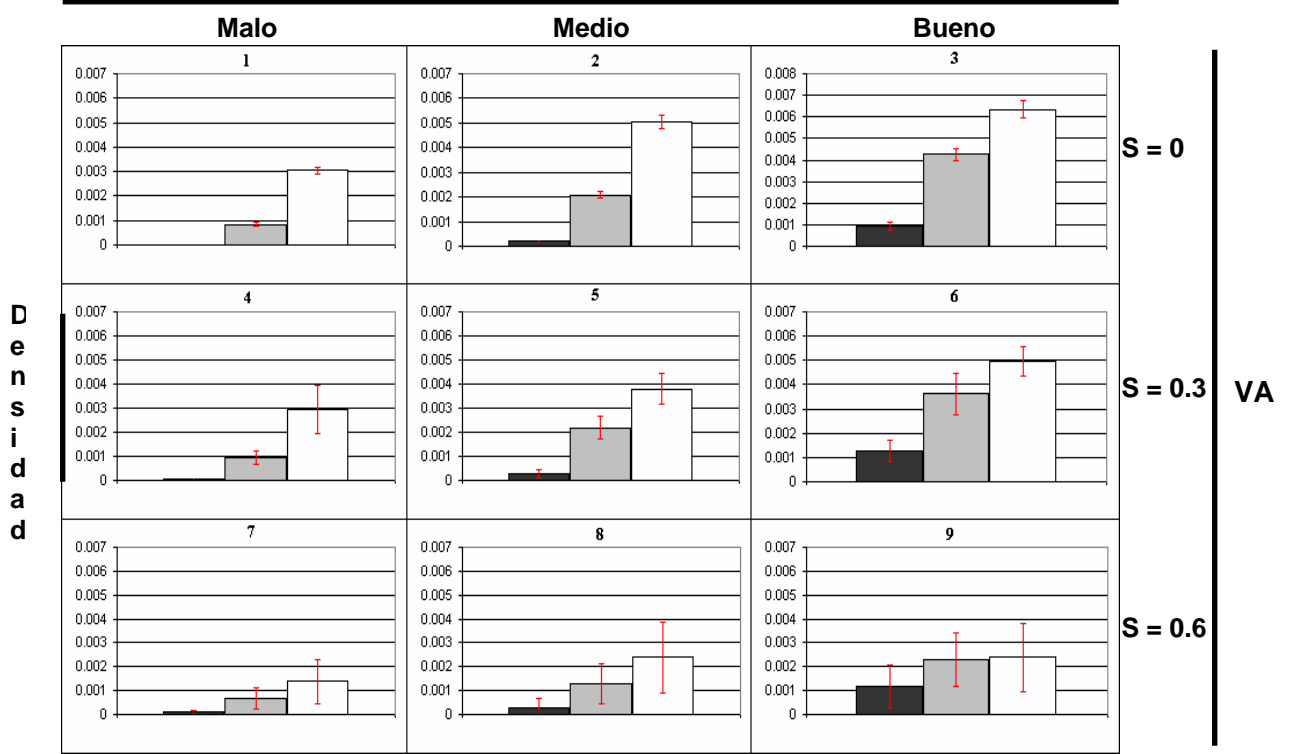


Figura 18: Gráfico de la dinámica poblacional promedio ($n = 20$) de los escenario Exterior Malo-Interior Bueno para tres diferentes regímenes de variabilidad ambiental en un periodo de análisis de 100 años y la respectiva línea de tendencia de cada dinámica. A la derecha se aprecia el valor de cada pendiente obtenida con el análisis de regresión.

Medias de la densidad Poblacional La Figura 19 contiene los gráficos de las medias de la densidad poblacional promedio de carnívoros ($n = 20$) para un periodo de 100 años eliminando el efecto de las condiciones iniciales. En cada gráfico se muestra el error estándar calculado para cada media en función de la varianza de la muestra. Al igual que la figura 17 cada gráfico contiene tres escenarios para cada experimento, con igual exterior y diferente interior.

Se apreció que las malas calidades de hábitat del entorno disminuyeron las medias poblacionales de carnívoros en el interior del espacio protegido, independiente a las condiciones presentes en el interior. A mejor calidad de hábitat exterior ($C_{cal} = 12$), mayores fueron las medias poblacionales. Las mayores diferencias de las medias poblacionales, entre un exterior negativo y uno positivo, se apreciaron en los escenarios sin variabilidad ambiental. Una mayor VA disminuyó considerablemente la diferencia entre las medias poblacionales para iguales condiciones interiores.

Calidad del Interior



Calidad de Exterior

- Malo
- Medio
- Bueno

Figura 19: Gráficos de medias poblacionales de carnívoros (n = 20). Cada gráfico muestra tres medias poblacionales de carnívoros y su respectivo error estándar para un interior del área protegida y tres diferentes condiciones de exterior. Hacia abajo se muestran los mismos escenarios para diferentes condiciones de variabilidad ambiental (VA) calculado para un periodo de análisis de 100 años para eliminar las condiciones iniciales.

Variabilidad ambiental Una mayor variabilidad ambiental modificó considerablemente las varianzas en las dinámicas de la densidad poblacional. Mientras más variabilidad ambiental, mayores fueron los errores estándar (Figura 19), modificando con esto el equilibrio general del sistema (Figura 17, gráficos 7, 8 y 9). Aún cuando la variabilidad ambiental aumentó la varianza poblacional, el efecto del espacio también tuvo influencia y entregó otros resultados sobre las medias poblacionales. Para el escenario más realista, es decir un entorno malo y un interior bueno, se realizó un análisis de varianza para conocer

si existían diferencias significativas de las medias poblacionales para dichos escenarios con diferentes condiciones de variabilidad ambiental (VA) (Figura 19, gráficos 3, 6 y 9). Este análisis arrojó como resultado que no existe un efecto de la variabilidad ambiental sobre la media de la dinámica de las densidades de carnívoros para el escenario Malo Fuera-Bueno Dentro ($2,09921063 < F_{0,99,2,57}$), contrario a lo sucedido con los otros escenarios donde una mayor variabilidad implicó menor media poblacional, principalmente los escenarios con condiciones más positivas.

El efecto de la calidad del espacio continuó siendo importante. Cuando las condiciones fueron negativas dentro y fuera (Figura 17, gráficos 1, 4 y 7; Figura 19 gráficos 1, 4 y 7) la población de carnívoros se extinguió, independiente de la variabilidad ambiental.

Persistencia

Los resultados mostraron una marcada diferencia entre los porcentajes de extinciones producidas en los diferentes escenarios y en particular en los diferentes experimentos. Las mayores extinciones se presentaron en los escenarios con un ambiente negativo dentro y fuera (100%), es decir escenarios Exterior Malo–Interior Malo (Figura 20, gráficos 1, 4 y 7).

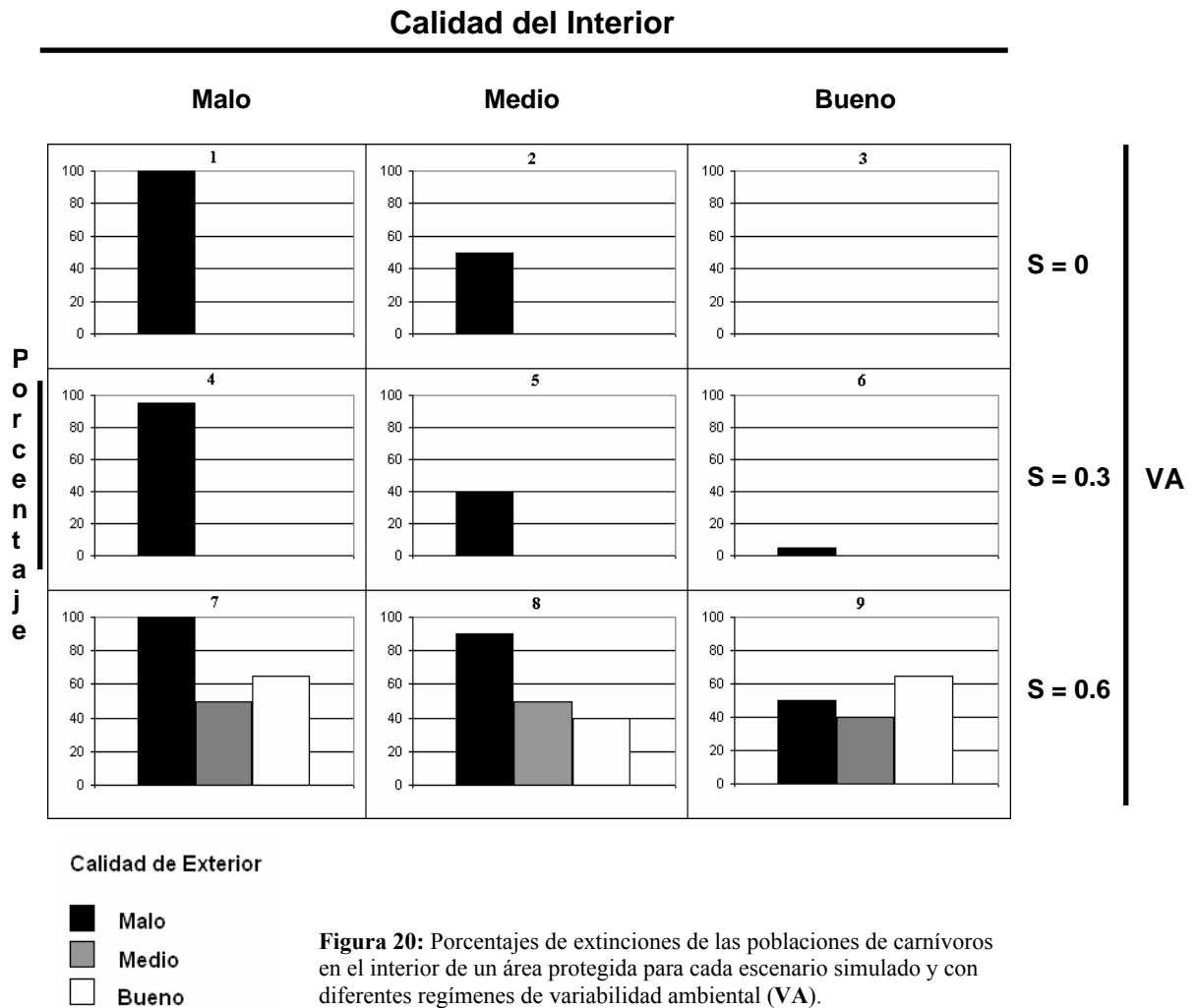
Para el experimento 1 ($S = 0$) solo se produjeron extinciones en los escenarios Exterior Malo-Interior Malo y Exterior Malo-Interior Medio (Figura 20; gráficos 1 y 2). El escenario Exterior Malo-Interior Bueno no presentó extinciones.

Para el experimento 2 ($S = 0,3$) los resultados fueron muy similares a los del experimento 1, pero el escenario Exterior Malo-Interior Bueno presentó un 5% de extinciones, a diferencia del experimento 1 donde en este escenario no se presentaron extinciones.

En el experimento con mayor variabilidad ambiental ($S = 0,6$), los resultados mostraron un alto porcentaje de extinción en los escenarios extremos, es decir en el escenario Exterior Malo-Interior Malo (100%) y el escenario Exterior Bueno-Interior Bueno (65%), mientras

que en los escenarios intermedios las extinciones rodearon el 50%. Los escenarios con menor porcentaje de extinciones fueron Exterior Medio-Interior Bueno (Figura 20, gráfico 8) y Exterior Bueno-Interior Medio (Figura 20, gráfico 9), con un 40% cada uno.

Un hecho que fue analizado con más detalle es el que se muestra en el gráfico 9 de la Figura 20, donde el porcentaje de extinciones del escenario Exterior Bueno-Interior Bueno (65%) fue mayor que en el escenario Exterior Malo-Interior Bueno (50%). Se hizo una prueba chi-cuadrado, donde se observó que no existe relación entre el tipo de escenario y el porcentaje de extinciones ($2,5361 < X^2_{0.05, 1}$).



DISCUSIÓN

Con los resultados obtenidos se confirman las predicciones propuestas ya que se ve claramente el efecto del entorno en diferentes condiciones ambientales, sobre las dinámicas poblacionales de carnívoros en el interior del área protegida. Estos resultados demuestran la importancia de las condiciones en las cuales un parque o reserva se encuentran inmersas.

En este trabajo solo se presentó una relación entre los carnívoros y las condiciones de productividad primaria, de manera muy simple y directa, sin tomar en cuenta otros efectos negativos densoindependientes y relacionados con los alrededores de las áreas protegidas, como por ejemplo la relación entre asentamientos humanos y mortalidad de carnívoros (Patterson et al. 2004) o el efecto de la propia estructura social de las especies (Piit et al. 2003) etc. Se recomienda que en futuros estudios estos aspectos sean tomados en cuenta para conocer más a fondo el efecto del entorno de un área protegida. A pesar de lo anterior y a partir de mis resultados, se puede decir claramente que el ecosistema se altera considerablemente en diferentes condiciones de exterior de las áreas protegidas.

Los resultados de esta población simulada coinciden con los de Holmgren et al. (2001), Woodroffe y Ginsberg (1998) y Lovari et al. (1993), respecto a que los efectos de las variaciones ambientales, producen modificaciones importantes en las dinámicas poblacionales de los carnívoros. Esta situación no debe extrañar ya que el sistema se mantiene conectado de tal manera que los efectos producidos en un nivel afectan a cada individuo por separado, pero crean una variabilidad de la dinámica poblacional significativamente mayor. Las modificaciones en un nivel del sistema pueden producir alteraciones en otros niveles en forma de cascada, y aún cuando los cambios climáticos pueden ser menos drásticos y menos variables que los simulados en este trabajo, la variabilidad ambiental puede ser en algunos casos más alta que la simulada, producto de otros procesos, principalmente de tipo antrópicos. La hipótesis que se puede manejar en este caso es que las posibilidades de persistencia de una especie son dependientes de las velocidades de cambios entre un fenómeno de variabilidad y las modificaciones en las

características biológicas y/o culturales de las especies (evolución). Es decir, dada una escala espacial y temporal de análisis, una especie que modifica su esquema (características) con mayor velocidad que otra, tiene una mayor probabilidad de persistencia en igual condición de variabilidad ambiental. Posteriores estudios podrían incluir modificaciones dinámicas en los algoritmos ecológicos, simulando así esquemas coevolutivos de las poblaciones de carnívoros y presas con la productividad primaria, y determinar cual es el efecto de la variabilidad ambiental sobre diferentes especies en un ecosistema coevolutivo. Pareciera ser un tema de suma importancia para conocer por ejemplo si el efecto antrópico sobre los diferentes componentes de un ecosistema es el mismo o no.

Un resultado interesante, con respecto al “valor ecológico” de los entornos más pobres, como mencionan Foruz y Kindlmann (2001) y Holt (1997), es el hecho de que en periodos de estrés ambiental (o mayor variabilidad ambiental), un espacio protegido (escenarios con mejores calidades de hábitat interior) con un entorno pobre (condiciones negativas en el exterior), no presentó diferencias significativas en la media poblacional, con respecto al mismo escenario sin variabilidad ambiental. De hecho, una variabilidad media ($S = 0,3$) permitió una disminución en la tendencia decreciente de la densidad que se aprecia en el mismo escenario cuando no existe variabilidad ambiental. Ahora bien, estos resultados simplemente muestran una tendencia a la estabilidad promedio de la población simulada, en esta configuración espacial y en condiciones de mayor variabilidad ambiental con respecto a otros escenarios, pero igual mantienen un mayor porcentaje de extinción para ambientes demasiado variables (experimento 3; $S = 0,6$). En este sentido, es precisa una visión diferente con respecto a la relación entre las llamadas áreas protegidas, las especies, la variabilidad ambiental y nuestro comportamiento como modeladores del paisaje. La configuración de ambiente “bueno” y entorno “malo” pareciera ser parte de un fenómeno más general, y que se relaciona con la estructura interna de un sistema y su relación energética con el entorno, a un nivel de resolución dado y sin importar la escala espacial de análisis (Prigogine, 1983). En este estudio, cuando los carnívoros que se movilizaron de un ambiente productivo hacia otro menos productivo y eran eliminados del sistema (muerte), se creaba una disipación de la energía. Al ser un sistema abierto alejado del equilibrio

térmico, esta energía se perdía y no era recuperada dentro del sistema, pero se puede pensar en que era incorporada teóricamente en otros sub-sistemas también abiertos y que no fueron incluidos en el modelo de manera implícita, como por ejemplo en biomasa de animales carroñeros, en la utilización de las pieles y carnes por poblaciones nativas, biomasa de la micro fauna, etc. Esta disipación y pérdida energética permitió una disminución de las oscilaciones poblacionales, cuando el ambiente interior positivo permitía mantener sustentable a la población en el tiempo. Ahora bien, en este trabajo se creó un sistema muy simple que buscaba otros objetivos, por lo que es preciso realizar otros estudios con objetivos que permitan determinar si existe o no una relación entre estos resultados y la dinámica de cualquier sistema complejo que interactúa y se diferencia de su ambiente exterior. Pero ciertamente este hecho demuestra que un área protegida y su entorno no son excluyentes y deben ser analizados desde otras perspectivas y no como unidades aisladas.

Para someter al modelo a una validación en terreno y comprobar cual es el efecto del entorno de un área protegida real sobre una población cualquiera de carnívoros, sería necesario un esfuerzo conjunto de una cantidad considerable de investigadores de diferentes áreas, desde eco fisiólogos hasta ecólogos de paisaje. En este sentido, las características de los organismos y sus procesos (algoritmos), y por ende los de las poblaciones y comunidad creadas, deben sufrir modificaciones en el caso de estudios concretos en terreno con especies reales de carnívoros y presas. También será necesario un mayor ajuste en la relación sustrato- ingreso energético, donde una serie de procesos a una escala inferior tienen una gran influencia en la emergencia de la configuración espacial y temporal del nivel de sustrato a nuestra escala de trabajo. Se recomienda la inclusión de factores climáticos más detallados en posteriores estudios de variabilidad ambiental.

Estudios futuros permitirían conocer más acerca de los sistemas complejos y la relación de éstos con las medidas prácticas que se pueden tomar para el manejo y conservación de grandes sistemas vivos de los cuales somos parte importante. Este trabajo sirve para ilustrar que las visiones reduccionista y holística son complementarias desde un punto de vista teórico, y que la realización de estudios aplicados de la nueva ciencia de la complejidad permite explorar un sistema desde fuera y obtener resultados emergentes que

no pueden definirse como leyes, pero que confirman o desechan intuiciones manifiestas, y que a la larga permiten indagar más a fondo en las cuestiones planteadas. Para el caso de modelos basados en individuos, la simpleza en la creación de códigos permite establecer sistemas con una complejidad estructural mayor a la creada en este trabajo, donde la única limitación es la capacidad de procesamiento de información por parte de los computadores (Lomnicki, 1992). Por ejemplo, para este trabajo solo se utilizaron matrices de poblaciones donde los individuos solo tenían características de peso y posición en el espacio, pero la flexibilidad de este tipo de modelos permite la inclusión de un mayor número de características de los organismos, como puede ser el sexo de los individuos (Crowley et al. 2005) o enfermedades de éstos (Leung y Grenfell, 2003). La inclusión de estas características debe ser en relación a una pregunta concreta, a la cantidad y capacidad de procesamiento de información que se tenga y por último a las habilidades del programador.

Desde el punto de vista práctico este trabajo sirvió para ilustrar que las características del entorno de un área protegida en el manejo de dichas áreas es fundamental en la reestructuración de las medidas que las autoridades tomen a futuro. En este sentido algunas consideraciones para el manejo integrado de los espacios naturales serían:

Primero, es necesaria una mirada hacia la historia ecológica y conocer cuales fueron los mecanismos que crearon las configuraciones actuales que percibimos en los espacios naturales y sus alrededores, y así tener un mayor conocimiento de cual ha sido el efecto de las actividades productivas y la relación de éstas con la dinámica de los sistemas naturales (Ramirez y Folchi, 1995), todo esto con el propósito de definir soluciones a largo plazo, las cuales seguramente serán de tipo dinámicas y no absolutas (Meir et al. 2004) y, segundo, es sumamente importante contar con herramientas tecnológicas más poderosas que permitan un mayor almacenamiento de información espacial. Los patrones y los procesos que crearon dichos patrones se encuentran íntimamente ligados, por lo que las configuraciones espaciales que tenemos actualmente, y que observamos gracias a las imágenes satelitales, se relacionan íntimamente con los procesos que ocurrieron y que seguirán ocurriendo en el espacio.

CONCLUSIÓN

En definitiva, con la elaboración de esta tesis, se pudo concluir que:

- El espacio en el cual se desarrollan los individuos cumple un papel fundamental en la dinámica de las poblaciones de carnívoros.
- A gran escala los carnívoros son un grupo de especies que movilizan y traspasan una gran cantidad de energía e información en las áreas protegidas. Por lo tanto no basta con definir arbitrariamente un sector para la protección, debemos analizar también la configuración espacial en la cual se encuentra el área que queremos proteger y conocer las implicancias del entorno sobre los individuos, especies, comunidades y ecosistemas a proteger.
- Debemos conocer y caracterizar los entornos de las áreas protegidas, a una escala mayor y con mayor nivel de detalle, para programar soluciones dinámicas y a largo plazo, no solo para la protección de especies, sino también para que las poblaciones humanas puedan convivir en armonía y de manera sustentable con las áreas naturales destinadas a la protección. En este sentido, las estrategias de protección de áreas silvestres deben tomar en cuenta el espacio exterior de éstas, ya que los flujos de información, y en definitiva de materia, traspasa los límites, artificiales o no, producto del movimiento de individuos de diferentes especies.
- La variabilidad ambiental es un hecho de gran trascendencia para la futura conservación a largo plazo de ecosistemas naturales. Los resultados demuestran que las fuertes modificaciones en las condiciones ambientales producen colapsos en las dinámicas poblacionales. Este es un hecho importante, que las autoridades pertinentes deben tomar en consideración para crear políticas, estrategias, planes y medidas para enfrentar las consecuencias de las grandes variaciones ambientales producidas ya sean por el hombre o por la naturaleza.

- La simulación de sistemas ecológicos y en especial los modelos basados en individuos son una herramienta muy poderosa para la investigación. A pesar de ser un modelo de simulación con traspaso de información de un nivel a otro, la realidad no escapa a esto. Los efectos de la variabilidad ambiental se expresan de manera física en el espacio, alterando los equilibrios energéticos de los ecosistemas y en definitiva sus niveles de información. Por ende, los resultados mantienen una lógica que debe ser tomada en cuenta, para realización de posteriores estudios empíricos, los cuales pueden ayudar a la creación de medidas para la protección de ecosistemas a largo plazo, cuando las condiciones seguramente sean muy diferentes a las actuales, tomando en cuenta los cambios climáticos que se están produciendo en todo el planeta.
- **Eco_Lógica 1.0** puede seguir aportando conocimiento en diferentes ámbitos de la ecología, desde como influyen las condiciones intrínsecas de los individuos en la composición espacial y temporal de las poblaciones, hasta cómo se comportan genéricamente los ecosistemas. En un futuro, este tipo de herramientas tecnológicas permitirán conocer más a fondo la composición de los ecosistemas y la relación de éstos con la humanidad, con el fin último de la sustentabilidad.

LITERATURA CITADA

- Arnold, M. y Osorio, F. 1998. Introducción a los conceptos de la Teoría General de Sistemas. *Epistemología de Ciencias Sociales* 3. Disponible en: <http://rehue.csociales.uchile.cl/publicaciones/moebio/03/index.htm>. Leído el 12 de Julio de 2005.
- Banks, H. and Potter, L. 2004. Probabilistic methods for addressing uncertainty and variability in biological models: application to a toxicokinetic model. *Mathematical Bioscience* 192: 193-225.
- Benoit, C. 1996. Representatividad ecológica del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado. *En: Muñoz M., H. Núñez y J. Yáñez. (Eds.). Libro rojo de los sitios prioritarios para la conservación de la diversidad biológica en Chile. Corporación Nacional Forestal (CONAF), Santiago. 203pp.*
- Crowley, P., C. Stieha, and N. McLetchie. 2005. Overgrowth competition, fragmentation and sex ratio dynamics: a spatially explicit, sub-individual-based model. *Ecology Journal of Theoretical Biology* 233: 25-42.
- Frouz, J. and P. Kindlmann. 2001. The role of sink to source re-colonisation in the population dynamics of insects living in unstable habitat: an example of terrestrial chironomids. *OIKOS* 93: 50-58.
- Gell-Mann, M. 1996. Fundamental sources of unpredictability. *In: Proceedings of the conference Fundamental Sources of Unpredictability. Santa Fe, New Mexico, EEUU March 28-30, 1996. Santa Fe Institute. Santa Fe, New Mexico, EEUU.*
- Gell-Mann, M. 2003. *El quark y el jaguar. Aventuras en lo simple y lo complejo. Tusquets, Barcelona, España. 413 p.*
- Grimm, V. 1999. Ten years of individual-based modelling in ecology: what have we learned and what could we learn in the future?. *Ecological Modelling* 115: 129-148.
- Hannah, L., G. Midgley, G. Hughes and B. Bomhard. 2005. The view from the Cape: extinction risk, protected areas and climate change. *Bioscience* 55: 231-242.
- Holmgren, M., M. Scheffer, E. Escurra, J. Gutierrez and G. Moren. 2001. El Niño effects on the dynamics of terrestrial ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution* 16(2): 89-94.

- Holt, R. 1997. On the evolutionary stability of sink populations. *Evolutionary Ecology* 11: 723-731.
- Huse, G., E. Strand and J. Giske. 2000. Implementing behaviour in individual-based models using neural networks and genetic algorithms. *Evolutionary Ecology* 13: 469-483.
- Kauffman, S. 2003. *Investigaciones. Complejidad, autoorganización y nuevas leyes para una biología general*. Tusquets, Barcelona, España. 372 p.
- Kostova, T. and T. Carlsen. 2004. The effect of habitat size and predation on the time to extinction of prairie vole populations: simulation studies via SERDYCA. *Ecological Complexity* 2: 35-57.
- Leung, B. and B. Grenfell. 2003. A spatial stochastic model simulating a scabies epidemic and coyote population dynamics. *Ecological Modelling* 166: 41-52.
- Lomnicki, A. 1992. Population Ecology from the individual perspective. Pp. 3-17. *In: De Angelis, D. and L. Gross (Eds.). Individual based models and approaches in ecology. Population, communities and ecosystems*. Chapman & Hall, New York, EEUU. 525 p.
- Lovari, S., P. Valier, and M. Ricci. 1993. Ranging behavior of red foxes (*Vulpes vulpes*) in relation to environmental variables, in mediterranean mixed pinewood. *Journal Zoology London* 232: 323-339.
- Margalef, R. 1980. *La biosfera: entre la termodinámica y el juego*. Omega, Barcelona, España. 236 p.
- Margalef, R. 2000. *Teoría de los sistemas ecológicos*. Omega, Barcelona, España. 290 p.
- Meir, E., S. Adelman and H. Possingham. 2004. Does conservation planning matter in a dynamic and uncertain world?. *Ecology Letters* 7: 615-622.
- Miller, S., J. Rottmann, K. Raedeke and R. Taber. 1983. Endangered mammals of Chile: status and conservation. *Biological Conservation* 25: 335-352.
- Odum, E. 1986. *Fundamentos de ecología*. Interamericana, México, DF, México. 271 p.
- Parrott, L. and R. Kok. 2000. Incorporating complexity in ecosystem modelling. *Complexity International* 7: 1-19.
- Patterson, B., S. Kasiki, E. Selempo and R. Kays. 2004. Livestock predation by lions (*Panthera leo*) and other carnivores on ranches neighboring Tsavo National Park, Kenya. *Biological Conservation* 119: 507-516.

- Pauchard, A. 1999. SNASPE: nuevos desafíos para la conservación biológica. Boletín Ingenieros Forestales por el Bosque Nativo. Junio: 5-10. Valdivia, Chile.
- Peters, R. and J. Darling. 1985. The greenhouse effects and nature reserves. *BioScience* 35: 707-717.
- Pitt, W., P. Box, and F. Knowlton. 2003. An individual-based model of canid population: modelling territoriality and social structure. *Ecological Modelling* 166: 109-121.
- Salvatori, V., G. Vaglio-Laurin, P.L. Meserve, L. Boitani and A. Campanella. 1999. Spatial organization, activity and social interactions of culpeo foxes (*Pseudalopex culpaeus*) in north-central Chile. *Journal of Mammalogy* 80: 980-985.
- Prigogine, I. 1983. La nueva alianza. Alianza, Madrid, España. 263 p.
- Ramírez, F. y M. Folchi. 1995. La propuesta de la Historia Ecológica en la renovación de la historiografía nacional. Pp. 1-17. *En*: Seminario permanente de Historia Ecológica. Santiago, Chile. Diciembre, 1995. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Simonetti, J. and J. Mella. 1997. Park size and the conservation of Chilean mammals. *Revista Chilena de Historia Natural* 70: 213-220.
- Sole, R., J. Gamarra, M. Ginovart and D. López. 1999. Controlling chaos in ecology: from deterministic to individual-based models. *Bulletin of Mathematical Biology* 61: 1187-1207.
- Tallar, D.F. 2000. La ley sobre bases generales del medio ambiente y el sector forestal. *En*: Seminario Medio Ambiente, Biodiversidad y Actividades Productivas. Corporación Nacional Forestal (CONAF). Santiago, Chile. CONAF. Santiago, Chile.
- Turchin, P. 1998. Quantitative analysis of movement. Sinauer, Sunderland, Massachusetts. 396 p.
- Ulanowicz, R. 2004. On the nature of ecodynamics. *Ecological Complexity* 1: 341-354.
- Urban, D., R. O'neill, and H. Shugart. 1987. Landscape ecology: A hierarchical perspective can help scientists understand spatial patterns. *BioScience* 37: 119-127.
- Woodroffe, R. and J. Ginsberg. 1998. Edge effects and the extinction of populations inside protected areas. *Science* 280: 2126-2128.
- World Conservation Union (IUCN). 1994. Guidelines for Protected Areas Management Categories. IUCN, Cambridge, UK and Gland, Switzerland. 261p. Disponible en: http://www.unep-wcmc.org/protected_areas/categories/. Leído el 10 abril de 2005.

Wu, J. and D. Marceau. 2002. Modelling complex ecological systems: an introduction. *Ecological Modelling* 153: 1-6.

APÉNDICES

Apéndice 1**Código del modelo de Simulación Eco_Lógica 1.0**

Creado por Andrés Baeza C.
 Licenciado en Recursos Naturales Renovables
 Universidad de Chile
 e-mail: andres.baeza@gmail.com

'Activación de las condiciones iniciales del sistema

```
Private Sub iniciar_Click()
  Randomize
```

'Declara las variables

```
Dim Color As Single
Dim col As Single
Dim ed As Integer
Dim edz As Integer
Dim inicial As Double
a = Text6
```

'Coordenadas de gráficos

```
picpic.Scale (1, 1)-(202, 202)
naszor.Scale (0, 50)-(a, 0)
muerzor.Scale (0, 50)-(a, 0)
grafico.Scale (0, 5000)-((6 * a), 0)
grafico2.Scale (0, 400)-((6 * a), 0)
prespreda.Scale (0, 400)-(5000, 0)
peszor.Scale (0, 18)-((6 * a), 0)
pesrat.Scale (0, 2)-((6 * a), 0)
cuantos = Text3
z = Text4
k = Text1
If cuantos >= 0 Then ReDim Presas (4, cuantos)
If cuantos >= 0 Then ReDim nasim (cuantos)
If z >= 0 Then ReDim carnívoros(4, z)
ReDim prombz (z)
ReDim prumz (z)
ReDim reprozor(z)
```

‘Abrir archivo con datos de variabilidad ambiental

‘aquí llenamos una matriz con valores extraídos de una tabla Excel
 Open "C:\Documents and Settings\Andres\Escritorio\nueva tesis\datosvariabilidad.csv"

```
For Input As #1
For I = 1 To 222
Input #1, Pp
datos(1, I) = Pp
Next I
Close #1
```

‘Ingreso de condiciones iniciales de sustrato

```
For I = 1 To 202
For J = 1 To 202
If (J > 50 And J < 150) And (I > 50 And I < 150) Then
bio = norm(65, 15) 'dentro
Else
bio = norm(56, 15) 'fuera
End If
If bio < 0 Then
bio = 0
End If
bos(I, J) = bio
Color = RGB(0, (255 * (bio / k)), 0)
picpic.PSet (I, J), Color
inicial = inicial + bos(I, J)
Next J
Next I
```

```
negro = RGB(0, 0, 0)
pezsor.Line (0, 14)-((6 * a), 14), negro
pezsor.Line (0, 9)-((6 * a), 9), negro
```

‘Ingreso de matriz de presas

```
For rt% = 1 To cuantos
peso = norm(1.65, 0.1)
x = Rnd * 199 + 2
y = Rnd * 199 + 2
ed = Rnd * 5
Presas(1, rt%) = peso
Presas(2, rt%) = x
Presas(3, rt%) = y
Presas(4, rt%) = ed
Color = RGB(255, 0, 0)
picpic.PSet (Presas(2, rt%), Presas(3, rt%)), Color
Next rt%
```

‘Ingreso de matriz de carnivoros

```

For zt% = 1 To z
pes = norm(12.5, 0.5)
xz = Rnd * 199 + 2
yz = Rnd * 199 + 2
If xz <= 2 Then
xz = 2
End If
If yz <= 2 Then
yz = 2
End If
carnivoros(1, zt%) = pes
inicial = inicial + carnivoros(1, zt%)
carnivoros(2, zt%) = xz
carnivoros(3, zt%) = yz
carnivoros(4, zt%) = zt%
Color = RGB(0, 0, 255)
picpic.PSet (carnivoros(2, zt%), carnivoros(3, zt%), Color)
Next zt%

End Sub iniciar

```

‘Llamado función externa

```

End Sub
Function norm(m, s)
Sum = 0
For I = 1 To 24
Sum = Sum + Rnd
Next I
norm = m + s * Sqr(0.5) * (Sum - 12)
End Function

```

‘Fin programa

```

Private Sub stop_Click()
End
End Sub

```

‘Activación de la dinámica del sistema

```
Private Sub dinamica_Click()
Randomize
'Form1.Visible = False
```

‘Declaración de Variables

```
Dim Color As Single      ' color sustrato
Dim col As Single       ' color carnivoros
Dim culor As Single     ' color presas
Dim naz As Integer, muer As Integer, muerz As Integer
Dim s As Integer, u As Integer, n As Double, v As Double
Dim c As Double, pic As Double, excr As Double, prep As Double
Dim pr As Double, pri As Double
Dim w As Integer
Dim q As Integer
Dim deriz As Integer
Dim prer As Double
Dim asim As Double 'asimilacion carnivoros
Dim pesorat As Double
Dim disp As Integer 'dispersión

'muerte de presas
Dim muertes As Integer
Dim den As Integer, fue As Integer, naden As Integer, nafue As Integer, mufue As Integer, muden As Integer
Dim movx As Double 'movivimiento
Dim movy As Double
Dim movxz As Integer
Dim movyz As Integer
Dim movimi As Double
Dim ñ As Double

Dim Heading(9) As String 'aquí vamos a guardar los nombres de los campos de Excel que después pasamos
a la función
Heading(0) = "Años"
Heading(1) = "Presas"
Heading(2) = "Carnivoros"
Heading(3) = "Peso de Presas"
Heading(4) = "Peso de Carnivoros"
Heading(5) = "Nacimientos de Presas"
Heading(6) = "Muerte de Carnivoros"
Heading(7) = "Nacimiento de Carnivoros"
Heading(8) = "Variabilidad ambiental"
```


'Años simulados

a = Text6

'Coordenadas de gráficos

naszor.Scale (0, 50)-(a, 0)
 muerzor.Scale (0, 50)-(a, 0)
 picpic.Scale (1, 1)-(202, 202)
 grafico.Scale (0, 2000)-((6 * a), 0)
 grafico2.Scale (0, 200)-((6 * a), 0)
 prespreda.Scale (0, 200)-(3000, 0)
 peszor.Scale (0, 18)-((6 * a), 0)
 pesrat.Scale (0, 2)-((6 * a), 0)
 vamb.Scale (0, 2)-(a, 0)

'Traspaso de variables desde interfase hacia el código

cu = 0
 k = Text1
 va = Text2
 c = Text5
 a = Text6
 disp = Text15
 asimrar = Text14
 excrat = Text13
 excr = Text7
 prep = Text8
 ccal = Text9
 asim = Text11
 prer = Text12

'Llamamos a la función que abre el workbook en Excel

Call Inicio_Excel

'Llamamos a la función que da el formato al nuevo workbook

Call Formato_Excel(9, Heading())

'Comienzo ciclo anual

```

For año = 1 To a
Randomize
objExcel.ActiveSheet.Cells(3 + año, 2) = año

```

'Definición de variable ambiental

```

kazza = Rnd * 70 'define el primer valor de variabilidad del experimento 3
g = 1 'Experimento 1
g = norm(1, 0.3) 'Experimento 2
g = datos(1, año + kazza) 'Experimento 3
'If g < 0 Then
'g = 0
'End If
objExcel.ActiveSheet.Cells(3 + año, 10) = g

```

'Ingreso el valor de sustrato para cada celda del espacio simulado

```

For I = 2 To 201
For J = 2 To 201
If año = 1 Then
MatrizA(I, J) = bos(I, J)
Else
'aquí definimos las condiciones exteriores e interiores del área protegida
If (J > 50 And J < 150) And (I > 50 And I < 150) Then
ccal = 10 'dentro
Else
ccal = 7 'fuera
End If
'ingresamos el valor de sustrato para este año
MatrizA(I, J) = MatrizA(I, J) + g * ccal
End If
If MatrizA(I, J) >= k Then
MatrizA(I, J) = k
End If
If (J > 50 And J < 150) And (I > 50 And I < 150) Then
susin = susin + MatrizA(I, J) 'dentro
Else
susout = susout + MatrizA(I, J) 'fuera
End If
'dandole color a la cosa
Color = RGB(0, (255 * (MatrizA(I, J) / k)), 0)
picpic.PSet (I, J), Color
Next J
Next I

```

'Promedio de sustrato

```
psusin = susin / 10000
psusout = susout / 30000
```

```
objExcel.ActiveSheet.Cells(3 + año, 27) = psusin
objExcel.ActiveSheet.Cells(3 + año, 28) = psusout
susin = 0
susout = 0
```

'Comienzo ciclo mensual

```
For mes = 1 To 6
cu = cu + 1
rojo = RGB(255, 0, 0)
prespreda.PSet (cuantos, z)
```

'Comienzo ciclo diario

```
For dia = 1 To 30
ka = ka + 1
```

'Muerte de presas

```
For rt% = 1 To cuantos
Color = RGB(255, 0, 0)
color = RGB(0, (255 * (MatrizA(Presas(2, rt%), Presas(3, rt%)) / k)), 0)
picpic.PSet (Presas(2, rt%), Presas(3, rt%)), color
If Presas(1, rt%) <= 0 Then
muer = muer + 1
End If
Next rt%
```

```
cuant = cuantos - muer
If cuant >= 0 Then ReDim rat(4, cuant)
```

```
For t% = 1 To cuantos
If Presas(1, t%) > 0 Then
s = s + 1
rat(1, s) = Presas(1, t%)
rat(2, s) = Presas(2, t%)
rat(3, s) = Presas(3, t%)
rat(4, s) = Presas(4, t%)
picpic.PSet (Presas(2, t%), Presas(3, t%)), Color
End If
Next t%
```

```
cuantos = cuant
ReDim Presas (4, cuantos)
```

```

For t% = 1 To cuantos
Presas(1, t%) = rat(1, t%)
Presas(2, t%) = rat(2, t%)
Presas(3, t%) = rat(3, t%)
Presas(4, t%) = rat(4, t%)
Next t%
s = 0
muer = 0
'If cuantos = 0 Then
'GoTo 500
'End If
objExcel.ActiveSheet.Cells(3 + cu, 3) = cuantos
objExcel.ActiveSheet.Cells(3 + cu, 4) = z

```

'Consumo de Presas

```
cons = 3
```

```

For rt% = 1 To cuantos
Presas(1, rt%) = Presas(1, rt%) - excrat * Presas(1, rt%)
pal = MatrizA(Presas(2, rt%), Presas(3, rt%)) / k
palim = pal - Rnd
If palim >= 0 Then 'And Presas(1, rt%) <= 2
MatrizA(Presas(2, rt%), Presas(3, rt%)) = MatrizA(Presas(2, rt%), Presas(3, rt%)) - cons
End If
If MatrizA(Presas(2, rt%), Presas(3, rt%)) < 0 Then
MatrizA(Presas(2, rt%), Presas(3, rt%)) = 0
End If
Next rt%

```

'Probabilidad de movimiento de presas

```
color = RGB(255, 0, 0)
```

```

For rt% = 1 To cuantos
Color = RGB(0, (255 * (MatrizA(Presas(2, rt%), Presas(3, rt%)) / k)), 0)
pal = MatrizA(Presas(2, rt%), Presas(3, rt%)) / k
If pal <= 0.4 Then
pr = 0.5
pri = pr - Rnd
If pri < 0 Then
Presas(2, rt%) = Presas(2, rt%)
Presas(3, rt%) = Presas(3, rt%)
picpic.PSet (Presas(2, rt%), Presas(3, rt%)), color
Else
picpic.PSet (Presas(2, rt%), Presas(3, rt%)), Color
100 'Do
ratpesx = 0
ratpesy = 0

```

```

ñ = Rnd
If ñ >= 0 And ñ < 0.33 Then
movx = -1
End If
If ñ >= 0.33 And ñ < 0.66 Then
movx = 0
End If
If ñ >= 0.66 And ñ <= 1 Then
movx = 1
End If
ñe = Rnd
If ñe >= 0 And ñe < 0.33 Then
movy = -1
End If
If ñe >= 0.33 And ñe < 0.66 Then
movy = 0
End If
If ñe >= 0.66 And ñe <= 1 Then
movy = 1
End If
ratpesx = Presas(2, rt%) + movx
ratpesy = Presas(3, rt%) + movy
If ratpesx < 2 Or ratpesx > 201 Or ratpesy < 2 Or ratpesy > 201 Or (movx = 0 And movy = 0) Then
GoTo 100
End If
Presas(2, rt%) = ratpesx
Presas(3, rt%) = ratpesy
End If
End If
picpic.PSet (Presas(2, rt%), Presas(3, rt%)), color
Next rt%

```

'Consumo de carnívoros

```

For zt% = 1 To z
caja = 0
carnivoros(1, zt%) = carnivoros(1, zt%) - carnivoros(1, zt%) * excr
If carnivoros(1, zt%) < 0 Then
carnivoros(1, zt%) = 0
End If
For rt% = 1 To cuantos
If caja > 4.5 Or carnivoros(1, zt%) >= 16 Then
GoTo 90
End If
If Presas(2, rt%) = carnivoros(2, zt%) And Presas(3, rt%) = carnivoros(3, zt%) And Presas(1, rt%) > 0 Then
pcom = Text10
palz = pcom - Rnd
If palz >= 0 Then
caja = caja + Presas(1, rt%)
ferom(Presas(2, rt%), Presas(3, rt%)) = ferom(Presas(2, rt%), Presas(3, rt%)) - 1
Presas(1, rt%) = 0

```

```
End If
End If
Next rt%
```

```
90
carnivoros(1, zt%) = carnivoros(1, zt%) + caja * asim
cul = RGB(0, 0, 255)
picpic.PSet (carnivoros(2, zt%), carnivoros(3, zt%)), cul
If caja = 0 Then
col = RGB(0, (255 * (MatrizA(carnivoros(2, zt%), carnivoros(3, zt%))) / k), 0)
picpic.PSet (carnivoros(2, zt%), carnivoros(3, zt)), col
```

'Movimiento de carnivoros

```
1000
rew = 0
re = 0
inflac = (1.45 - (carnivoros(1, zt%) / (c - 1)))
If inflac < 0 Then
inflac = 0
End If
indmov% = 1 + inflac * 11.11111
movxz% = Rnd * (indmov * 2) - indmov
movyz% = Rnd * (indmov * 2) - indmov
rew = carnivoros(2, zt%) + movxz%
re = carnivoros(3, zt%) + movyz%
If rew < 2 Or rew > 201 Or re < 2 Or re > 201 Or (movxz = 0 And movyz = 0) Then
GoTo 1000
End If
carnivoros(2, zt%) = rew
carnivoros(3, zt%) = re
movzox = movzox + rew
movzoy = movzoy + re
End If
cul = RGB(0, 0, 255)
picpic.PSet (carnivoros(2, zt%), carnivoros(3, zt%)), cul
Next zt%
```

```
Next dia
```

'Movimiento promedio de la población de carnívoros

```
pmovx = movzox / z
pmovy = movzoy / z
movimi = (pmovx + pmovy) / 30
objExcel.ActiveSheet.Cells(3 + cu, 13) = movimi
movzox = 0
movzoy = 0
```

'Peso promedio de presas

```

For rt% = 1 To cuantos
pesorat = pesorat + Presas(1, rt%)
Next rt%

```

```

If cuantos >= 1 Then
ratprm = pesorat / cuantos
End If
If año = 1 Then
pesrat.Line (0, ratprm)-(cu, ratprm)
Else
pesrat.Line -(cu, ratprm)
End If
objExcel.ActiveSheet.Cells(3 + cu, 5) = ratprm
pesorat = 0

```

'Muerte de carnívoros

```

For zt% = 1 To z
If carnívoros(1, zt%) > c Then
prumz(zt%) = 1
End If
If carnívoros(1, zt%) <= c And carnívoros(1, zt%) > (c - 1) Then
prumz(zt%) = 1
End If
If carnívoros(1, zt%) <= (c - 1)
prumz(zt%) = 0
End If
pic = Rnd
prombz(zt%) = prumz(zt%) - pic
If prombz(zt%) <= 0 Then
muerz = muerz + 1
col = RGB(0, ((255 * MatrizA(carnívoros(2, zt%), carnívoros(3, zt%))) / k), 0)
picpic.PSet (carnívoros(2, zt%), carnívoros(3, zt)), col
If carnívoros(2, zt%) > 50 And carnívoros(2, zt%) < 150 And carnívoros(3, zt%) > 50 And carnívoros(3,
zt%) < 150 Then
muden = muden + 1
Else
mufue = mufue + 1
End If
End If
Next zt%

```

```

cuanz = z - muerz
muertes = muertes + muerz
If cuanz >= 0 Then ReDim zor(4, cuanz)

```

```

For zt% = 1 To z
If prombz(zt%) > 0 Then
s = s + 1
zor(1, s) = carnívoros(1, zt%)
zor(2, s) = carnívoros(2, zt%)

```

```

zor(3, s) = carnívoros(3, zt%)
zor(4, s) = carnívoros(4, zt%)
End If
Next zt%

s = 0
z = cuanz
ReDim carnívoros(4, z) 'redefinición de matrices
ReDim probmz(z)
ReDim prumz(z)
ReDim reprozor(z)
For zt% = 1 To z
carnívoros(1, zt%) = zor(1, zt%)
carnívoros(2, zt%) = zor(2, zt%)
carnívoros(3, zt%) = zor(3, zt%)
carnívoros(4, zt%) = zor(4, zt%)
pesozor = pesozor + carnívoros(1, zt%)
Next zt%

If z >= 1 Then
pesprom = pesozor / z
End If
If año = 1 Then
peszor.Line (1, pesprom)-(cu, pesprom)
Else
peszor.Line -(cu, pesprom)
End If
objExcel.ActiveSheet.Cells(3 + cu, 6) = pesprom
pesozor = 0
muerz = 0
'If z = 0 Then
'GoTo 500
'End If
Next mes

```

'Reproducción de presas

```

For rt% = 1 To cuantos
vesi(1) = MatrizA(Presas(2, rt%) - 1, Presas(3, rt%) - 1)
vesi(2) = MatrizA(Presas(2, rt%), Presas(3, rt%) - 1)
vesi(3) = MatrizA(Presas(2, rt%) + 1, Presas(3, rt%) - 1)
vesi(4) = MatrizA(Presas(2, rt%) - 1, Presas(3, rt%))
vesi(5) = MatrizA(Presas(2, rt%) + 1, Presas(3, rt%))
vesi(6) = MatrizA(Presas(2, rt%) - 1, Presas(3, rt%) + 1)
vesi(7) = MatrizA(Presas(2, rt%), Presas(3, rt%) + 1)
vesi(8) = MatrizA(Presas(2, rt%) + 1, Presas(3, rt%) + 1)
pty = (vesi(1) + vesi(2) + vesi(3) + vesi(4) + vesi(5) + vesi(6) + vesi(7) + vesi(8)) / 8
nasim(rt%) = pty / 40
na = na + nasim(rt%)
Presas(1, rt%) = 0
Next rt%

```



```

objExcel.ActiveSheet.Cells(3 + año, 7) = na
cuant = cuant + na

If cuant >= 0 Then ReDim rat(4, cuant)
For o% = 1 To cuantos
s = s + 1
rat(1, s) = Presas(1, o%)
rat(2, s) = Presas(2, o%)
rat(3, s) = Presas(3, o%)
rat(4, s) = Presas(4, o%)
Next o%

For op% = 1 To cuantos
If nasim(op%) >= 1 Then

For tt% = 1 To nasim(op%)
s = s + 1
rat(1, s) = 1.6
deriz = norm(0, disp)
rat(2, s) = Presas(2, op%) + deriz
deriz = norm(0, disp)
rat(3, s) = Presas(3, op%) + deriz
rat(4, s) = 1
If rat(2, s) <= 2 Then
rat(2, s) = 2
End If
If rat(3, s) <= 2 Then
rat(3, s) = 2
End If
If rat(2, s) >= 201 Then
rat(2, s) = 201
End If
If rat(3, s) >= 201 Then
rat(3, s) = 201
End If
Next tt%

End If
Next op%

cuantos = cuant
ReDim Presas (4, cuantos) 'redefinición de matrices
ReDim nasim (cuantos)

For t% = 1 To cuantos
Presas(1, t%) = rat(1, t%)
Presas(2, t%) = rat(2, t%)
Presas(3, t%) = rat(3, t%)
Presas(4, t%) = rat(4, t%)
Next t%

s = 0
na = 0

```

'Reproducción de carnívoros

```

For zt% = 1 To z
If zt% = 1 Then
numzor = carnívoros(4, zt%)
End If
If zt% > 1 Then
If carnívoros(4, zt%) > numzor Then
numzor = carnívoros(4, zt%)
End If
End If
If carnívoros(1, zt%) >= prep Then
prepe = 0.8
reprozor(zt%) = prepe - Rnd
Else
reprozor(zt%) = 0
End If
If reprozor(zt%) > 0 Then
naz = naz + 1
End If
Next zt%

cuanz = cuanz + naz
If cuanz >= 0 Then ReDim zor(4, cuanz)

```

```

For zt% = 1 To z
u = u + 1
zor(1, u) = carnívoros(1, zt%)
zor(2, u) = carnívoros(2, zt%)
zor(3, u) = carnívoros(3, zt%)
zor(4, u) = carnívoros(4, zt%)
Next zt%

```

```

For zt% = 1 To z
If reprozor(zt%) > 0 Then
u = u + 1
zor(1, u) = norm(11.3, 0.1)
carnívoros(1, zt%) = carnívoros(1, zt%) - 2
Randomize
ñ = Rnd
If ñ >= 0 And ñ < 0.33 Then
movxz = -2
End If
If ñ >= 0.33 And ñ < 0.66 Then
movxz = 0
End If
If ñ >= 0.66 And ñ <= 1 Then
movxz = 2
End If
ñ = Rnd
If ñ >= 0 And ñ < 0.33 Then

```

```

movyz = -2
End If
If ñ >= 0.33 And ñ < 0.66 Then
movyz = 0
End If
If ñ >= 0.66 And ñ <= 1 Then
movyz = 2
End If
zor(2, u) = carnívoros(2, zt%) + movxz
zor(3, u) = carnívoros(3, zt%) + movyz
zor(4, u) = numzor + 1
If zor(2, u) > 201 Then
zor(2, u) = 201
End If
If zor(3, u) > 201 Then
zor(3, u) = 201
End If
If zor(2, u) < 2 Then
zor(2, u) = 2
End If
If zor(3, u) < 2 Then
zor(3, u) = 2
End If
If zor(2, u) > 50 And zor(2, u) < 150 And zor(3, u) > 50 And zor(3, u) < 150 Then
naden = naden + 1
Else
nafue = nafue + 1
End If
End If
Next zt%

numzor = 0
z = cuanz
If z >= 0 Then ReDim carnívoros (4, z) 'redefinición de matriz
ReDim prombz(z)
ReDim prumz(z)
ReDim reprozor(z)

For zt% = 1 To z
carnívoros(1, zt%) = zor(1, zt%)
carnívoros(2, zt%) = zor(2, zt%)
carnívoros(3, zt%) = zor(3, zt%)
carnívoros(4, zt%) = zor(4, zt%)
Next zt%

If año = 1 Then
muerzor.Line (0, muertes)-(año, muertes)
naszor.Line (0, naz)-(año, naz)
Else
muerzor.Line -(año, muertes)
naszor.Line -(año, naz)
End If

```

'Posición de la población de carnívoros

```

For zt% = 1 To z
If carnívoros(2, zt%) > 50 And carnívoros(2, zt%) < 150 And carnívoros(3, zt%) > 50 And carnívoros(3,
zt%) < 150 Then
den = den + 1
Else
fue = fue + 1
End If
Next zt%

```

'Salida de variables

```

objExcel.ActiveSheet.Cells(3 + año, 8) = muertes
objExcel.ActiveSheet.Cells(3 + año, 9) = naz
objExcel.ActiveSheet.Cells(3 + año, 15) = den
objExcel.ActiveSheet.Cells(3 + año, 16) = fue
objExcel.ActiveSheet.Cells(3 + año, 17) = naden
objExcel.ActiveSheet.Cells(3 + año, 18) = nafue
objExcel.ActiveSheet.Cells(3 + año, 19) = muden
objExcel.ActiveSheet.Cells(3 + año, 20) = mufue
u = 0
naz = 0
den = 0
fue = 0
naden = 0
nafue = 0
mufue = 0
muden = 0
Next año

```

'Mensaje de extinción

```

500
'If cuantos = 0 Then
'MsgBox ("la poblacion se extingue")
'End If
Text3.Text = cuantos
Text4.Text = z
objExcel.Visible = True

```

```

End Sub 'fin face simulación

```