

# BRINZAL V. 1.0.

## Modelo de simulación de fijación de C de brinzales bajo distintos escenarios silvícolas y ambientales



Autores: María Elena Fernández, CONICET-INTA EEA Bariloche, Argentina

Javier E. Gyenge, CONICET-INTA EEA Bariloche, Argentina

José A. Reque Kilchenman, Univ. de Valladolid, España



**BRINZAL v. 1.0., modelo de simulación de fijación de C de brinzales bajo distintos  
escenarios silvícolas y ambientales**

*Autores: M<sup>a</sup> Elena Fernández\*, Javier Gyenge\*, José A. Reque\*\**

\* Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria Bariloche.

Paraje Villaverde s/n, CC 277, 8400, San Carlos de Bariloche (Argentina); ecoforest@bariloche.inta.gov.ar;  
jgyenge@bariloche.inta.gov.ar

\*\* Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia. Universidad de Valladolid.

Avenida de Valladolid 44, 34071 Palencia (España); requech@pvs.uva.es

## INDICE

<b>0. RESUMEN</b>	<b>5</b>
<b>I. INTRODUCCION GENERAL</b>	<b>7</b>
<b>II. SILVICULTURA Y REGENERACIÓN FORESTAL</b>	
II.1. Definiciones	<b>9</b>
II.2. Características de la actuación silvícola	<b>10</b>
II.3. La regeneración de las masas forestales. Tratamientos silvícolas de regeneración (Tratamientos generales)	
II.3.1. Definiciones	<b>12</b>
II.3.2. Base ecológica de los tratamientos silvícolas de regeneración	<b>13</b>
II.3.3. Diferenciación entre los distintos tratamientos silvícolas de regeneración	
II.3.3.1. Condiciones ecológicas creadas por la corta	<b>14</b>
II.3.3.2. Amplitud temporal de ejecución de las cortas de Regeneración	<b>14</b>
II.3.3.3. Forma principal y fundamental de masa resultante	<b>15</b>
II.3.3.4. Composición específica resultante	<b>15</b>
II.3.3.5. Función y objetivo asignado a la masa forestal	<b>16</b>
II.3.3.6. Organización superficial de las cortas	<b>16</b>
II.3.3.7. Procedencia de la semilla	<b>18</b>

II.3.4. Los distintos tratamientos silvícolas de regeneración en monte alto (tratamientos generales)	18
II.3.5. Regeneración natural y los factores que la condicionan	19
II.3.5.1. Factores ambientales	20
II.3.5.2. Semilla y vecería	23
II.3.5.3. Condiciones de germinación	26
II.3.5.4. Ecofisiología de la especie	28
II.3.5.5. Vegetación competidora	31
II.3.5.6. Predación por herbívoros	32
II.3.5.7. Restos de corta	32
<b>III. LOGICA DEL MODELO- PRINCIPALES RELACIONES</b>	
III.1. Relaciones lógicas entre módulos y variables	34
III.2. Variables intervinientes y unidades	
III.2.1. Módulo Suelo y Clima	39
III.2.2. Módulo Regeneración	41
III.2.3. Módulo Características del bosque y su silvicultura	43
<b>IV. GUIA DEL USUARIO DEL MODELO BRINZAL v. 1.0.</b>	
IV.1. Herramientas que utiliza el programa Stella®	45
IV.2. Utilización del modelo Brinzal v.1.0.	
IV.2.1. Menú principal	46
IV.2.2. Módulo Suelo y Clima	48
IV.2.3. Módulo Bosque y Silvicultura	49
IV.2.4. Módulo Regeneración	50
IV.2.5. Pantallas de Resultados	52
IV.3. Descripción de las relaciones matemáticas entre variables del Modelo	
IV.3.1. Módulo Suelo y Clima	53
IV.3.2. Módulo Bosque y Silvicultura	58
IV.3.3. Módulo Regeneración	61
<b>V. BIBLIOGRAFIA CITADA</b>	<b>66</b>
<b>VI. BIBLIOGRAFIA ADICIONAL SUGERIDA</b>	<b>67</b>
<b>ANEXO I</b>	
AI.1. Parámetros hidráulicos para clases texturales de suelo promedio determinados por el USDA	69

AI.2. Modelo de van Genuchten (1980) de retención de agua en suelo	<b>70</b>
AI.3. Cálculo de la evapotranspiración potencial según el modelo de Thornthwaite (1948, 1955)	<b>71</b>

## 0. RESUMEN

El modelo Brinzal v. 1.0. es un modelo semi-empírico de simulación de la fijación de C, y su acumulación en biomasa, a lo largo de un día para brinzales de cualquier especie leñosa. Constituye una innovación docente con el fin principal de proveer una herramienta que permita visualizar mediante salidas gráficas y tablas, cómo distintas estructuras de bosque y prácticas de manejo del mismo afectan el microambiente que experimenta un brinzal en su sotobosque, y cómo responde éste de acuerdo a sus principales características morfo-fisiológicas.

El modelo, desarrollado como una aplicación del programa Stella®, se estructura en tres módulos interrelacionados: Módulo de características del bosque y su silvicultura, Módulo de Clima y Suelo, y Módulo de Regeneración. Los principales aspectos silvícolas que el usuario puede modificar son la estructura diamétrica del rodal (y así, simular raleos), la cantidad de área foliar de los árboles (y así, simular podas), la remoción total o parcial de las especies del sotobosque, modificaciones en la textura-estructura del suelo, y distintas alturas de restos de corta. El módulo de Clima y Suelo contempla la demanda evaporativa para el brinzal (determinada por la temperatura y la humedad relativa del aire), y la disponibilidad efectiva de radiación y agua en suelo para el renoval, factores todos determinados por las características físicas del sitio (tipo de suelo, clima) y afectados por la presencia del dosel arbóreo. El módulo de Regeneración incluye las características morfológicas (relación de Huber, asignación de biomasa, altura del brinzal, etc) y fisiológicas (respuesta fotosintética a la radiación, susceptibilidad a la fotoinhibición, conductancia estomática, vulnerabilidad a la cavitación, etc) de la especie en regeneración.

Tomando en cuenta los fines docentes de la presente aplicación, en primera instancia se brinda una revisión general de conceptos relacionados con la regeneración de especies arbóreas, incluyendo los factores ambientales y ecofisiológicos que la determinan. Asimismo, se revisan los tratamientos silvícolas que se postulan tradicionalmente para hacer un manejo orientado a promover la regeneración forestal. En un segundo apartado se presenta la lógica general del modelo Brinzal y las principales relaciones entre las variables que lo conforman. Finalmente, el tercer apartado constituye una guía para el usuario del modelo,

explicándose las herramientas de la aplicación, modo de uso del programa, tipos de salidas, y las relaciones matemáticas entre las variables.

## I. INTRODUCCION GENERAL

El presente trabajo ha surgido como fruto de una estancia de investigación y docencia de los dos primeros autores en la Universidad de Valladolid, España, en el Departamento de Producción Vegetal y Recursos Forestales, donde desarrolla su labor docente y de investigación el tercer autor. Los primeros desarrollan actividades de investigación en el campo de la Ecofisiología Forestal, así como dictan un curso de postgrado en Argentina, su país de origen, en forma periódica acerca de los fundamentos de dicha disciplina, integrando los conocimientos que la misma brinda a la gestión forestal. El tercer autor es profesor de Silvicultura. Cuando pensamos en cómo integrar enfoques de nuestras disciplinas de base surgió la idea de desarrollar un modelo de simulación que ayudara en la enseñanza de las complejas interrelaciones que se dan entre el manejo de una masa forestal, las condiciones microambientales que experimentan las plantas en su sotobosque como fruto del mismo, y la ecofisiología de las especies. En particular, nos centramos en el problema de la regeneración, pues ésta es uno de los elementos claves que hacen a la perpetuidad del bosque, y por lo tanto, debe ser un aspecto crucial a considerar en la gestión del mismo. Así surgió el modelo Brinzal v.1.0, el cual posee tres módulos interrelacionados que describen la estructura del bosque y su manejo, el ambiente físico y su modificación por el primero, y los brinzales, cuya respuesta en fijación de C y crecimiento al ambiente físico y biológico dependerá de sus características morfo-fisiológicas.

El nivel de complejidad que puede dársele al modelo es prácticamente infinito, así como lo son las mejoras futuras que podrán incorporársele. Esta es una primera versión que ya constituye una innovación docente, especialmente en nuestra lengua española, pretendiendo contribuir a la enseñanza universitaria de la ecofisiología de especies leñosas en un marco de su aplicación a la gestión forestal. Asimismo, en las cátedras de Silvicultura podrá ser útil para incorporar los conceptos de ecofisiología claves para entender la respuesta de la regeneración a las distintas prácticas de manejo. En este sentido es un primer intento integrador de dos disciplinas íntimamente emparentadas en lo teórico, pero poco emparejadas en la práctica, sea esto en su enseñanza universitaria como en la gestión misma de los recursos forestales.

Tomando en cuenta los fines docentes del presente trabajo, en primera instancia se brinda una revisión general de los aspectos silvícolas más importantes en relación con la regeneración, con énfasis en los factores que la condicionan. En segunda instancia, se presenta la lógica del modelo *Brinzal v1.0* y las principales relaciones entre sus variables. Finalmente, se brinda una guía para el usuario, explicando las herramientas y potencialidades de uso del modelo, las posibles salidas del mismo, y las relaciones matemáticas entre variables.

Esperamos que esta contribución sea de utilidad para todos los potenciales usuarios –docentes, alumnos, profesionales, investigadores en formación– estimulando una visión integradora e interdisciplinaria a la hora de pensar y gestionar los bosques.



## II. SILVICULTURA Y REGENERACIÓN FORESTAL

### II.1. DEFINICIONES

La Sociedad Española de Ciencias Forestales (SECF 2005) define el término **selvicultura** (sinónimo silvicultura; inglés: silviculture; francés: sylviculture; alemán: Waldbau) como: "Teoría y práctica que controla el establecimiento, desarrollo, composición, sanidad, calidad, aprovechamiento y regeneración de las masas forestales, para satisfacer las diversas necesidades de la sociedad, de forma continua o sostenible".

Por su parte, Hawley & Smith (1982) definen:- *"Selvicultura es la aplicación de los conocimientos de la Ecología Forestal al cuidado del bosque. Es la teoría y práctica del control del establecimiento, la composición y la creación de un bosque"*.

*"En Selvicultura la información dada por la Ecología Forestal se aplica a la producción de masas arbóreas y se elaboran principios y procedimientos técnicos para el mantenimiento y la reproducción de dichas masas."* (Hawley & Smith, 1982).

Atendiendo a las definiciones puede considerarse a la selvicultura como una Ecología Forestal aplicada, cuyo objetivo es obtener la máxima producción de beneficios directos o indirectos del monte adaptándolos a las necesidades de la economía, garantizando la perpetuación del medio y asegurando que su rendimiento no disminuya a lo largo del tiempo. Una de las premisas fundamentales de la gestión forestal es asegurar la persistencia del recurso forestal a lo largo del tiempo. La garantía del cumplimiento del principio de persistencia pasa por posibilitar la regeneración forestal al tiempo que se hace compatible la renovación del ecosistema con la consecución de los usos y fines que el monte debe cumplir.

Las producciones del monte pueden ser económicamente cuantificables, también llamadas beneficios directos (maderas, resinas, frutos, corchos, etc.) o de difícil cuantificación monetaria, los denominados bienes indirectos, como es el caso de las importantísimas funciones protectora, recreativa o social.

La compatibilidad de la producción con la conservación de la naturaleza implica que el enfoque ecológico tenga que estar siempre integrado en las actuaciones selvícolas. En este contexto es acertado citar a Spurr (1980): *"Un análisis de la biología forestal, organizado y enseñado más frecuentemente desde un punto de vista ecológico, es tan importante para un administrador de recursos como un conocimiento de los negocios*

*económicos y una competencia en las matemáticas de las mediciones y estimaciones forestales."*

La Selvicultura tradicional engloba a las repoblaciones forestales. La Sociedad Española de Ciencias Forestales en el Diccionario Forestal (2005) define: *"Todas las operaciones que contribuyen a la creación de una nueva masa forestal en una superficie que pudo o no haber estado previamente cubierta de bosque, hasta que se la considera implantada. También se designa así a la masa forestal artificial creada.* (Sinónimos.: repoblación forestal, repoblación artificial, reforestación, forestación. Inglés: reforestation, forestation, afforestation). En las repoblaciones forestales se implantan principalmente especies arbóreas y en menor medida, matorrales y pastos. Los objetivos con los que se realizan las repoblaciones pueden ser diversos. La producción de materia prima forestal, la protección y conservación de suelos, la mejora y restauración del medio natural, el embellecimiento paisajístico, el uso múltiple y recreativo son las funciones más representativas.

Otro concepto importante de definir en el contexto del presente trabajo es el de **Brinzal**, que da nombre al modelo de simulación desarrollado. Este se refiere al ejemplar, normalmente arbóreo, procedente de la germinación de una semilla (sinónimos: ingl: sapling, seedling; fr.: semis; alem.: Sämling; Kernwuchs, e.g. Serrada et al. 2007).

## II.2. CARACTERÍSTICAS DE LA ACTUACIÓN SILVÍCOLA

Las actuaciones silvícolas y repobladoras estarán básicamente regidas por una planificación a largo plazo y por una reducida posibilidad de manipulación del medio sobre el que se actúa. Esta característica obliga al selvicultor a utilizar técnicas supeditadas y marcadas por las exigencias biológicas y ecológicas del medio. La consecución de los objetivos productivos será siempre dependiente de la viabilidad biológica y ecológica de la técnica a emplear.

La gestión a largo plazo y los bajos rendimientos obtenidos por hectárea de los bosques no justifican intervenciones intensas y repetidas. Esto hace que en selvicultura se adopten técnicas con carácter extensivo en las cuales se atiende más al conjunto de individuos que constituyen la masa forestal que al individuo aislado.

En la agricultura, por contra, se utilizan ciclos productivos cortos y de alto rendimiento económico, en los cuales la manipulación del medio puede realizarse eficazmente aplicando

técnicas y principios biológicos para obtener los objetivos deseados. A menudo los cuidados se centran en el individuo aislado, como en la arboricultura o en los cultivos intensivos.

Los bajos rendimientos por hectárea de los montes hacen que las actuaciones silvícolas sean distantes en el tiempo y poco continuas. Esta propiedad y el carácter extensivo de las actuaciones hacen que uno de los principios básicos de la selvicultura haya sido "*la utilización del producto como herramienta*".

Como herramientas fundamentales de trabajo en selvicultura se utilizarán artificios basados en la interacción entre elementos naturales. Así, por ejemplo, se podrá fomentar la poda natural de los distintos pies de la masa manteniendo la masa en fuerte espesura impidiendo de esta forma el desarrollo de ramas bajas. De esta manera se consigue la poda sin necesidad de recurrir a medios artificiales. Una vez obtenidos fustes sin ramas en su parte inferior se podrá proceder a apeaar una serie de individuos para disminuir la competencia en la masa y así permitir el óptimo desarrollo de los mejores pies.

Otro ejemplo muy característico de utilización del producto como herramienta está en los sistemas silvopastorales. En estos no se suelen justificar económicamente abonados o enmiendas. Los efectos de estas caras actuaciones se pueden conseguir, entre otros, manteniendo un arbolado que realice funciones de bombeo de nutrientes y aporte de materia orgánica.

Para la consecución de los objetivos asignados se imitarán y manejarán puntual y artificialmente algunos procesos naturales. Una de las actuaciones más típicas en este aspecto es la corta de regeneración. Apeando un número determinado de pies se consigue emular las perturbaciones que afectan naturalmente a estos ecosistemas. De esta manera, abriendo huecos y discontinuidades en el vuelo, se puede obtener el aprovechamiento y la regeneración natural del rodal sin necesidad de recurrir a siembras o plantaciones artificiales.

Otro de los rasgos diferenciales de la selvicultura es el anticipo y la imitación de algunos procesos naturales. Mediante cortas, por ejemplo, el selvicultor conseguirá anticiparse a los fenómenos de muerte natural que inevitablemente se producen en cualquier masa forestal debido a la competencia intra- e interespecífica. Así, al influir en la estructura y composición de la masa se consigue controlar y modificar la competencia. Esto permitirá centrar la producción bruta de una masa en algunos pies y especies determinadas obteniendo un mayor rendimiento económico y aprovechando unos productos que se acabarían perdiendo por la propia competencia.

Otro ejemplo está en las repoblaciones forestales con las cuales se puede acelerar la sucesión natural. En zonas degradadas, la instalación de especies climácicas es técnica y ecológicamente muy difícil, debido a la estrategia demográfica que estas especies suelen presentar. Recurriendo a especies arbóreas frugales, tolerantes, adaptadas a suelos empobrecidos y espacios abiertos se podrá conseguir a medio plazo crear un cierto microclima forestal. Bajo la cubierta y protección de los árboles colonizadores, denominados "*nodrizas*", se podrán implantar con mayor facilidad a partir de este momento las especies climácicas.

Las características descritas hacen que el horizonte de actuación sobre los montes sea de siglos. Aunque algunos proyectos en silvicultura puedan ser a corto plazo nunca se deberá olvidar que el ser humano solo es un usufructuario del medio natural. El aprovechamiento racional del bosque no implica el agotamiento del recurso ni es excluyente de la conservación de la naturaleza. Probablemente una de las facetas más fascinante de la selvicultura sea ésta.

El silvicultor, como responsable directo de la gestión forestal, deberá tener una gran amplitud de miras en sus planificaciones y para ello será necesaria la colaboración de técnicos y especialistas de otras materias afines a la forestal. Debido a la complejidad del medio sobre el que se actuará se hace necesario el trabajo en equipos multidisciplinares.

## **II.3. LA REGENERACIÓN DE LAS MASAS FORESTALES. TRATAMIENTOS SILVÍCOLAS DE REGENERACIÓN (Tratamientos Generales)**

### **II.3.1. Definiciones**

González & Vázquez (1947) definen los tratamientos silvícolas de regeneración (*sinónimo*: tratamientos generales) como "*Procesos culturales a los que se someten las masas forestales para reemplazar, total o parcialmente, el vuelo por otro nuevo, con miras al más adecuado cumplimiento de los objetivos que deban cumplir tales masas*". De la definición se desprende que los tratamientos generales incluyen a la vez la corta de la masa adulta y el establecimiento de una nueva generación salvaguardándose de esta forma la premisa de persistencia, principio básico de cualquier planificación forestal. También, las cortas de regeneración vendrán regidas por los fines marcados por los objetivos que deba cumplir la masa forestal.

### **II.3.2. Base ecológica de los tratamientos silvícolas de regeneración**

Es sabido que una de las bases fundamentales de la selvicultura está en la modificación de la competencia íter- e intraespecífica a que están sometidas las masas forestales. Los tratamientos generales son un ejemplo característico de esta afirmación.

En aras a conseguir la regeneración de una masa forestal el silvicultor actuará basándose en el temperamento de las distintas especies forestales a regenerar y en la respuesta de éstas a la competencia antes y después de las cortas de regeneración. Cabe recordar que el hombre no podrá influir directamente en factores tales como el clima, el suelo, la exposición, etc., pero sí estará en su mano modificar la competencia íter- e intraespecífica alterando de esta forma en mayor o menor medida el microclima del bosque (distinta humedad relativa, mayor o menor insolación, etc.).

Los tratamientos silvícolas de regeneración serán por tanto actuaciones tendentes a crear una serie de condiciones propicias para provocar la regeneración de las especies a aprovechar.

Estas actuaciones se centrarán principalmente en dos grandes bloques:

- La apertura o creación de discontinuidades en la cabida arbórea en las cuales se propiciará la instalación de la nueva generación. Se podrán compaginar estas actuaciones con la aplicación de tratamientos que mejoren las condiciones de germinación y desarrollo de los brinzales.
- La inducción de la fructificación a través del desarrollo de las copas de una serie de árboles a mantener en pie como fuentes de suministro de semilla.

En la determinación de la cuantía y el tipo de corta a aplicar será fundamental conocer la ecología de masas naturales similares a la que se pretende aprovechar. Con los tratamientos generales se imitarán, provocarán y guiarán los fenómenos naturales que provocan la regeneración natural de estas masas. El estudio de la dinámica evolutiva de las masas vírgenes permite obtener conclusiones básicas para el silvicultor en este aspecto.

### **II.3.3. Diferenciación entre los distintos tratamientos silvícolas de regeneración**

### **II.3.3.1. Condiciones ecológicas creadas por las cortas**

El primer rasgo diferencial entre los distintos tratamientos selvícolas de regeneración está en las condiciones ambientales o microambientales creadas por las cortas. Así se podrán crear, siempre de acuerdo con el temperamento de la especie, las siguientes condiciones ecológicas:

- Condiciones ecológicas similares a las que se presentan en un claro o superficie rasa,
- Situaciones de protección parcial al suelo o regenerado como las que se darían en claros del bosque.
- Condiciones ecológicas similares a las que aparecerían en pequeños huecos en la masa forestal.

De esta primera distinción entre tratamientos dependerá la intensidad de cada corta y la superficie sobre la cual se actuará en cada intervención. En consecuencia especies no tolerantes a la sombra o pioneras con marcada r-estrategia se regenerarán óptimamente en superficies rasas en las cuales aparezcan condiciones ecológicas de vacío competitivo e insolación directa. Se ajustarán a esta realidad las cortas a hecho (=tala rasa) o la utilización en repoblaciones de zonas degradadas sobre suelos poco evolucionados de especies pioneras. Especies con temperamentos tolerantes requerirán por contra para su regeneración cortas que interrumpan puntualmente la cabida, como son las entresacas o los aclareos sucesivos por bosquetes, ya que presentan estrategias favorables para la regeneración en las condiciones microambientales que se dan en medios con moderada a fuerte competencia y en suelos evolucionados.

### **II.3.3.2. Amplitud temporal de ejecución de las cortas de regeneración**

Otro factor diferencial de las cortas de regeneración se encuentra en la amplitud de tiempo durante el cual se ejecutan las cortas de regeneración. La extensión temporal durante la cual se provoca la regeneración y el número de intervenciones asociadas a éstas podrá ser muy variable. El rodal podrá ser regenerado en una sola intervención como en las cortas a hecho, o para su regeneración se requerirán varias decenas de

intervenciones que se extenderán a lo largo de todo el ciclo productivo de la masa como en las cortas por entresaca. El tiempo durante el cual se ejecutan las cortas de regeneración combinado con la intensidad con la que se aclara la masa influirá, como se verá más adelante, decisivamente en la composición específica de la masa resultante.

La planificación temporal de las cortas debe ser entendida por el selvicultor como una directriz orientadora de las actuaciones a lo largo del tiempo ya que la vecería, la climatología y cualquier otra alteración no prevista pueden imposibilitar cualquier aplicación estricta de las programaciones a medio y largo plazo.

### **II.3.3.3. Forma principal y fundamental de masa resultante**

La duración de las cortas de regeneración condiciona la forma principal de masa (clasificación de las masas forestales según la distribución de las edades de sus pies). Si las cortas se ejecutan en una sola intervención apeándose prácticamente la totalidad de la masa preexistente y la regeneración se consigue de forma inmediata, la masa resultante será coetánea al presentar ésta pies de igual edad (o al menos el 90% de éstos). Por el contrario, si el lapso de tiempo durante el cual se regenera una masa se amplía durante 10 a 30 años la masa resultante será regular al pertenecer al menos el 90% de los árboles de ésta a una misma clase artificial de edad. Si por ejemplo una superficie de corta (unidad selvícola de corta) es regenerada durante un lapso de tiempo (período de regeneración) de 20 años, todos los brinzales de la nueva generación tendrán como mínimo una edad comprendida entre 1 y 20 años al concluir las cortas de regeneración. Los brinzales de 1 año de edad corresponderán con aquellos pies regenerados el último año del período de regeneración que a su vez corresponderá con el último año del turno. Los pies de 20 años de edad serán aquellos instalados el primer año de las cortas de regeneración.

La forma fundamental de masa (clasificación de las masas forestales según el origen de sus pies) también vendrá definida por el tipo de tratamiento selvícola de regeneración. Generalmente las cortas tenderán a originar montes altos pero en el caso de ejecutarse a edades a las cuales las especies a aprovechar presentan capacidad de reproducción vegetativa se podrán originar montes bajos o medios.

### **II.3.3.4. Composición específica resultante**

Otro rasgo característico de los distintos tratamientos generales está en la composición específica de la masa a que dan lugar. En función de la secuencia de las actuaciones, el peso de la corta y del tamaño de las discontinuidades provocadas por las cortas se podrá generar masas de distinta composición específica. Se crearán por un lado masas monoespecíficas si con las cortas se crean condiciones favorables para la regeneración de una sola especie. Si gradualmente y durante un lapso de tiempo mayor se crean progresivamente situaciones acordes a las estrategias demográficas de distintas especies se propiciará la creación de masas pluriespecíficas. Muy frecuentemente es necesario recurrir a regeneración artificial para completar la regeneración si ésta es incompleta o si se estima conveniente introducir especies distintas a la aprovechada buscando así dar una mayor diversidad específica a la masa resultante. Éste último tipo de regeneración, denominado plantaciones o siembras de enriquecimiento, adquiere especial importancia en tratamientos que originen masas monoespecíficas.

Desde un punto de vista ecológico, si el medio lo permite, puede ser conveniente establecer discontinuidades en la masa para favorecer la creación de distintos hábitats para la fauna. Estas discontinuidades pueden ser por ejemplo áreas de pastizales o matorral.

#### **II.3.3.5. Función y objetivo asignado a la masa forestal**

El objetivo (protector, productor, etc.) que ha de cumplir la masa también distinguirá una corta de otra. Masas productoras requerirán para su regeneración tratamientos sencillos y con gran garantía de éxito. Si bien en las anteriores también deben minimizarse en lo posible los impactos negativos, en masas con función protectora, dado el objetivo de las mismas, éste es un elemento clave en la gestión, primándose aquellas actuaciones que eviten impactos fuertes y negativos.

Así, en selvicultura intensiva se suele recurrir a la regeneración artificial por su mayor garantía de éxito, mayor sencillez y a la necesidad de reanudar el ciclo productivo en el menor tiempo posible. Por el contrario, en selvicultura extensiva se suele optar por la regeneración natural debido a su menor coste.

#### **II.3.3.6. Organización superficial de las cortas**



Las cortas podrán progresar con el paso del tiempo sobre el terreno de diversas formas. Las cortas de regeneración podrán ser de muy diversa índole. Atendiendo a su aplicación superficial destacan:

- Aquellas que originan superficies rasas
- Cortas que se desarrollan a lo largo del tiempo según fajas colindantes a masas adultas.
- Cortas que progresan de forma concéntrica desde el interior de la masa hacia los límites de ésta, adaptándose al terreno o a necesidades de regeneración que pueda presentar la masa (bosquetes)
- Cortas que se ejecutan uniformemente sobre el terreno bajo la cubierta de una masa adulta.

La organización de las cortas a lo largo de la superficie a regenerar deberá conseguir y mantener una estructura de la masa que permita ajustar las necesidades de regeneración y de aprovechamiento óptimo de la capacidad productiva de la masa considerando: (a) las condiciones ecológicas de la estación, (b) la autoecología de la especie a regenerar, (c) posibles daños producidos por factores abióticos (vientos, insolación, desecación), (d) los presupuestos disponibles para la gestión y (e) las limitaciones tecnológicas del aprovechamiento.

Entre otros se deberán considerar los siguientes factores:

- *Vientos*: la existencia de vientos fríos invernales o de vientos terrales desecantes podrán ocasionar daños al regenerado o a la masa remanente. Para aminorar estas posibles pérdidas protegiendo la zona de corta se hará avanzar las cortas en sentido opuesto a la procedencia de estos vientos. Asimismo, en aras a garantizar una mayor diseminación lateral de semilla, las cortas se ejecutarán en sentido contrario a los vientos dominantes durante la época de diseminación de los frutos.
- *Insolación*: la insolación que recibe una superficie de corta de un tamaño determinado será distinta en umbría que en solana. Por tanto, las condiciones microclimáticas creadas en ambos casos podrán variar notablemente y también el sentido de avance de las cortas deberá ser distinto. Así, por ejemplo, en umbrías en comarcas frías puede ser conveniente hacer progresar las cortas en sentido solana - umbría para evitar daños de heladas en las superficies cortadas. Por el contrario, en solanas en clima seco y cálido, en las cuales la desecación del suelo puede ocasionar pérdidas en el

regenerado, las cortas avanzarán en sentido umbría - solana para evitar insolaciones excesivas.

- *Daños a la masa en pie y al regenerado:* las cortas de regeneración deberán ocasionar el mínimo daño a la masa en pie y al regenerado al tiempo que tenderán a facilitar el aprovechamiento de los productos. Las cortas se ejecutarán teniendo en cuenta el desarrollo de la regeneración evitando daños sobre ésta y procurando siempre realizar el desembosque a través de la masa adulta para así permitir una mayor maniobrabilidad de los medios de saca y disminuir de esta forma daños al regenerado. Suele ser conveniente por este motivo en cortas de aplicación uniforme a lo largo del rodal aplicar éstas desde el interior del rodal hacia el exterior
- *Simplificación de la gestión:* el aprovechamiento de los productos de la corta de regeneración vendrá determinado, entre otros, por la infraestructura viaria en la que se apoye la saca, por la densidad de la masa remanente y por la fisiografía del terreno.

### **II.3.3.7. Procedencia de la semilla**

La simiente que regenere una superficie podrá provenir de diversas fuentes.

- Procedencia lateral si la semilla procede de una masa colindante.
- Procedencia de pies mantenidos como árboles semilleros a lo largo de la superficie a regenerar
- Semilla procedente de las copas de árboles apeados.
- Semilla depositada en el suelo de forma natural y previa a las cortas de regeneración.
- Procedencia antrópica – Regeneración artificial por siembra o plantación

### **II.3.4. Los distintos tratamientos silvícolas de regeneración en monte alto (tratamientos generales)**

A la hora de exponer los diferentes tratamientos se seguirá la clásica sistemática dada por Hawley & Smith (1982)<sup>1</sup>. A saber:

A) *Métodos de cortas a hecho:* cortas ejecutadas en una sola intervención regenerando natural o artificialmente la masa. Estos métodos no permiten protección de

---

<sup>1</sup> No se tratará la regeneración asexual o vegetativa (Selvicultura de Monte Bajo)

ningún tipo al regenerado o al suelo. Comúnmente la regeneración se produce de forma artificial (siembra o plantación).

B) *Métodos de cortas a hecho en dos tiempos* (Cortas a hecho con reserva de árboles semilleros): cortas ejecutadas uniformemente a lo largo de una superficie, apeando todos los pies exceptuando de corta un limitado número de árboles (comúnmente menos del 10 %). La protección al suelo o a la regeneración natural es reducida.

C) *Métodos de corta por aclareo sucesivo*: cortas ejecutadas gradualmente durante un lapso de tiempo de 10 a 30 años (o como máximo, una cuarta parte del turno). El regenerado y el suelo disponen en las primeras fases del tratamiento de protección por parte de la masa adulta.

D) *Métodos de cortas por entresaca*: cortas que afectan irregularmente a árboles o grupos de árboles a lo largo de toda la masa. El tratamiento se extiende indefinidamente en el tiempo y tiende a mantener en pequeñas superficies una estructura de masa irregular. El suelo y la regeneración encuentran protección continua.

Ciertas variaciones a estos tratamientos son consideradas métodos independientes en la mayoría de los tratados de selvicultura centroeuropeos (Burschel & Huss, 1987; Mayer, 1992). Así, según las clasificaciones propuestas por éstos, se incluyen como métodos diferenciados los siguientes tratamientos:

A) *Métodos de cortas por fajas*: tratamientos en los cuales las cortas se sitúan colindantes a una masa adulta. Las fajas tendrán un ancho de 1 a 3 veces la altura media de los árboles y podrán ser cortadas total o parcialmente. En ellas la protección es únicamente lateral en el caso de apearse todos los pies de la faja y conjunta, lateral y vertical, en el caso de aclararse uniformemente la faja manteniendo árboles semilleros en la faja.

B) *Métodos de cortas por bosquetes*: cortas caracterizadas por un comienzo de la regeneración en varios pequeños núcleos. La superficie de estos núcleos o bosquetes oscila entre la cabida ocupada por 5 árboles adultos hasta un tamaño de diámetro equivalente a la altura media de los árboles. Los bosquetes son agrandados más o menos concéntricamente hasta juntarse y abarcar toda la superficie de corta. En este tratamiento el efecto borde es marcado.

### II.3.5. Regeneración natural y los factores que la condicionan

En el éxito de la regeneración influyen una serie de factores los cuales deberán ser tenidos en cuenta tanto por separado como en conjunto. "*Un método de reproducción es algo más que la realización de unas cortas. Las medidas suplementarias esenciales pueden incluir el control de los enemigos bióticos, las operaciones de cultivo para preparar el suelo, la reducción de la competencia de la vegetación indeseable, el uso o la exclusión del pastoreo, y la eliminación de restos, el problema de si deben emplearse tratamientos adicionales o de cómo deben ser modificados los métodos de corta quedará mejor planteado después de un análisis clínico de los diversos factores que intervienen en el proceso de la repoblación en cada situación*" (Hawley & Smith, 1982). Por lo expuesto, es crucial conocer qué factores afectan o condicionan los procesos de regeneración. Los mencionados autores hablan de un conjunto de eslabones de una cadena o etapas que se deben cumplir para poder darse la regeneración natural con éxito. En el caso de romperse un sólo eslabón fracasan todos los demás. De nada servirá, por ejemplo, obtener una abundante fructificación, si en el suelo no se presentan condiciones favorables para la germinación.

Muy a menudo será necesario recurrir a la regeneración artificial para complementar la regeneración natural. En este caso, denominado *regeneración asistida o complementada*, puede llegar a ser conveniente utilizar especies distintas a la principal para así dar una mayor diversidad específica a la nueva masa. Estas actuaciones, generalmente realizadas mediante plantación, reciben el nombre de *plantaciones de enriquecimiento*.

En general, los factores con mayor influencia en la regeneración son las características del ambiente físico (clima, suelo), la producción de semilla, las condiciones de germinación, las características ecofisiológicas de la especie, la presencia de vegetación competidora, la presión de predación por parte de herbívoros, y la presencia o no de restos de corta. A continuación se describe cada uno de estos factores.

### **II.3.5.1. Factores ambientales**

El ambiente físico y biológico (especies/individuos competidores-facilitadores-herbívoros-parásitos-bacterias-virus, etc) donde se desarrolla una planta es condicionante de los procesos fisiológicos que determinan su crecimiento y supervivencia.

En este apartado se tratarán brevemente los factores ambientales abióticos que condicionan el proceso de regeneración. Es ampliamente conocido que una planta requiere dos elementos fundamentales para poder fijar carbono: radiación y agua. La disponibilidad de ambos recursos, que no debe ser deficitaria ni tampoco en exceso, es crucial para permitir el proceso de fotosíntesis mediante el cual la planta transforma el carbono atmosférico en su propia biomasa.

La **cantidad de radiación** que llega al suelo en un determinado sitio es función de la posición de éste en el planeta (latitud, altitud) y en el paisaje (exposición, pendiente), la época del año, la nubosidad, y la cantidad de área foliar u objetos opacos (ejemplo, ramas) que haya interceptado radiación antes de que el rayo de sol llegue al suelo. Cuantas más hojas deba atravesar el rayo, más radiación fotosintéticamente activa se irá interceptando, disminuyéndose en forma exponencial la cantidad de luz, así como variándose la calidad de la misma (enriquecimiento relativo en el rojo lejano).

Las variables climáticas, particularmente la **pluviometría**, de un sitio determinan en primera instancia la cantidad de agua que puede haber en el suelo, condicionada ésta también por la textura del mismo, la cual restringe cuanta agua puede ser almacenada como máximo en determinado volumen de suelo, y la disponibilidad efectiva de la misma para la planta (retención de agua en el suelo, es decir, en qué potencial hídrico se encuentra).

La **temperatura del aire** condiciona todos los procesos bioquímicos de la planta, la cual funciona apropiadamente dentro de un rango óptimo de temperaturas. Valores por encima o por debajo de éstos disminuyen o inhiben los procesos fisiológicos, o incluso pueden llegar a producir daños irreparables en partes o la planta entera. Por su parte, la **humedad relativa del aire**, o mejor dicho el gradiente entre ésta y la que se encuentra en la hoja de la planta, determina la demanda evaporativa para la misma. Es decir, una atmósfera más seca y demandante determinará que, habiendo agua en el suelo, la planta transpire más. Si la disponibilidad de agua en el suelo es baja, atmósferas muy desecantes suponen un problema para la planta, que en primera instancia cerrará sus estomas para evitar la deshidratación. Sin embargo, el agua puede salir de los tejidos de la planta por otras vías (cuticular) por lo que si, la situación continúa, se puede llegar a la deshidratación de partes o de la planta entera.

La **velocidad de viento** también tiene un efecto fundamental sobre la tasa transpiratoria de una planta. Interviene removiendo la capa límite de aire húmedo que se encuentra inmediatamente sobre las hojas, acelerando las pérdidas de agua debido a que

se acrecienta el gradiente de vapor de agua entre la hoja y la atmósfera. Por ello, ambientes ventosos, además de los daños físicos que pueden producir en la planta, influyen sobre el estado hídrico de la misma, y en definitiva sobre su capacidad de mantener los estomas abiertos, es decir, fijar carbono, y así, sobrevivir y crecer.

Además de radiación y agua, una planta requiere determinados elementos químicos, denominados **nutrientes**. Algunos se requieren en mayor cantidad (macronutrientes: N, P, K, Ca, S, Mg), y otros en muy pequeñas dosis (micronutrientes: Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo, Cl). Estos elementos forman parte constitutiva de proteínas y otras moléculas biológicas (nucleótidos, ácidos grasos, etc), así como son necesarios para distintos procesos a nivel celular, como el transporte de sustancias a través de las membranas. Los nutrientes necesarios para el funcionamiento de la planta deben encontrarse en el suelo en concentraciones apropiadas (los micronutrientes pueden ser particularmente tóxicos en exceso), pero además, en formas biológicamente disponibles para la planta.

Por lo expuesto, el clima y suelo de un sitio son elementos fundamentales que condicionan la regeneración. El selvicultor no puede, obviamente, incidir en los factores macroambientales en los que va a tener que medrar el brinzal. Sí está en su mano modificar parcialmente el efecto de estos factores ambientales modificando el microambiente en el que éste se desarrolla. Posiblemente la actuación silvícola más común en este aspecto es la regulación de la cobertura de copas manteniéndola más cerrada o aclarada. Aclarando la masa se puede posibilitar, por ejemplo, un mayor acceso de luz al suelo, una menor interceptación del agua de lluvia o una mayor irradiación nocturna. Corresponderá al selvicultor definir cuál es la cobertura de copas óptima para cada especie y grado de desarrollo del brinzal. En el mismo sentido pueden valorarse las actuaciones de control de las especies del sotobosque (limpias), vegetación que al igual que el dosel de copas puede ejercer un efecto de facilitación o de competencia sobre el brinzal. Las características químicas del suelo son difíciles de modificar por parte del selvicultor salvo que se recurra a actuaciones de enmienda o fertilización. Más factible es la ejecución de laboreos tendentes a (1) mejorar la permeabilidad del suelo, (2) disminuir las pérdidas por evaporación al quebrar capilares, (3) aumentar la profundidad útil del suelo y su capacidad de retención de agua, (4) acelerar la descomposición y humificación de restos orgánicos (generalmente hojarasca) y (5) controlar vegetación competitiva. La actuación sobre el suelo debe ser meditada cuidadosamente pues puede desencadenar graves problemas de erosión o de rejuvenecimiento del perfil. Asimismo, los restos de

corta, al igual que la vegetación situada por encima del brinzal, pueden suponer un efecto de facilitación sobre la plántula al proporcionar protección física a la misma frente a las inclemencias ambientales. En el mismo sentido, una cobertura demasiado alta de restos de corta puede dificultar el desarrollo del brinzal. En la decisión sobre el tratamiento de restos de corta deberá por tanto buscarse un equilibrio entre las funciones positivas y negativas que los residuos forestales pueden suponer para los renovales.

### II.3.5.2. Semilla y vecería

La semilla es sin lugar a dudas el factor más influyente en la regeneración natural. A este respecto el primer punto a analizar es el número de pies semilleros a mantener para garantizar la regeneración. Será por tanto fundamental conocer la cantidad de semilla que se puede producir por unidad de superficie en años de buena fructificación. Cabe recordar la influencia de la espesura en la producción de fruto. Así masas espesas producen menos semilla que masas aclaradas por tener las primeras sus copas menos desarrolladas. De nada servirá provocar, acorde a la estrategia demográfica de la especie a regenerar, condiciones favorables a la regeneración natural si no se ha favorecido previamente mediante claras o cortas preparatorias el desarrollo de las copas de los futuros árboles semilleros para así garantizar una máxima fructificación. Así, por ejemplo, en parcelas experimentales de pino silvestre se ha encontrado que con una fracción de cabida cubierta de 1 sólo aparecían 78 semillas por metro cuadrado mientras que con una fracción de cabida cubierta de 0,7 se hallaban 215 semillas por metro cuadrado.

El conocimiento de las producciones de semilla en años de abundante fructificación es fundamental para poder planificar las cortas. Para determinar cuál es el número medio de semillas producidas por unidad de superficie se utilizan embudos similares a los pluviómetros. Los datos que se exponen a continuación dan una idea del número máximo de semillas producidas por hectárea con árboles padre bien desarrollados en años de abundante fructificación.

*	Pino silvestre (50 pies/ha) -	7000000 semillas/ha
*	Roble (50 pies/ha)	1500000 semillas/ha
*	Haya (50 pies/ha)	5000000 semillas/ha

La **vecería**, fenómeno natural por el cual no se producen fructificaciones abundantes anualmente, deberá ser considerada a la hora de programar los tratamientos

generales. Los motivos que pueden dar origen a la vecería pueden estar relacionados tanto con factores climáticos con decisiva influencia en la floración y en la fructificación, como en adaptaciones evolutivas de las especies tendentes a evitar el desarrollo de poblaciones estables de predadores de semillas.

La vecería y la producción de semilla pueden ser muy variables de una estación a otra y para poder prever el acaecimiento de años de abundante fructificación será necesario basarse en la experiencia local, en la observación y estudio del desarrollo de la floración. Las condiciones climáticas de año deberán mantenerse en unos valores adecuados para permitir la fructificación. Heladas tardías, tormentas, granizos y otros fenómenos meteorológicos adversos pueden - al igual que en agricultura - impedir la fructificación y hacer fracasar la regeneración natural. El poder conjeturar una buena cosecha de semilla es fundamental para poder programar las cortas y las ayudas complementarias a la regeneración (actuaciones sobre el suelo y vegetación competidora). La necesidad de obtener anualmente rentas constantes puede verse dificultada con la irregular producción de semilla que recomendará centrar las cortas de regeneración en años de abundante fructificación.

Del número de semillas viables diseminadas por unidad de superficie lógicamente no todas llegan a dar un brinzal. En líneas generales se acepta que rara vez más de un 10% de las semillas llega a desarrollar un brinzal de 2 ó 3 años, siendo este dato frecuentemente bastante inferior.

Otro factor fundamental en la determinación de la cantidad de semilla a obtener por unidad de superficie está en la **calidad fenotípica de los pies adultos productores de semilla**. Para producir una cierta mejora genética de la nueva generación, al tiempo que se garantiza una mayor producción de semilla y una mayor resistencia frente a fenómenos climatológicos adversos, será conveniente mantener como árboles padre los pies con mejores fenotipos.

La **distancia de polinización**, entendiéndose por ésta la distancia media a la que se deben situar dos árboles para garantizar la polinización, no suele presentar normalmente problemas en los bosques de clima templado. La distancia de polinización toma comúnmente unos valores situados entre 200 y 700 m. Sin embargo, en años de limitada floración y en superficies con un reducido número de árboles padre pueden ser esperados disminuciones en la diversidad genética de la nueva generación o incluso se pueden



producir fenómenos de autopolinización responsables, en muchos casos, de germinaciones reducidas o de desarrollos defectuosos de los brinzales.

Uno de los factores de mayor importancia a considerar en la planificación de la regeneración natural es la *distancia de diseminación*. La dispersión de la semilla dependerá de la altura de los pies productores de semilla, de los vientos y de las turbulencias que éstos acarrean, de la fisiografía del terreno y del peso de las semillas. Semillas pesadas (hayucos, bellotas, etc.) precisan de distribución zoogama para diseminarse a más de diez metros del árbol semillero. Sin la ayuda de aves, el haya sólo podría dispersarse 1 kilómetro cada 1000 años. No obstante en la época postglacial el desplazamiento de esta especie fue de 1000 a 2000 km en tan sólo 4000 a 5000 años. Para pino silvestre, a distancias aproximadas de dos veces la altura del árbol se puede encontrar aproximadamente un 50 % de las semillas que aparecen bajo las copas de los árboles. Por el contrario, a distancias de cuatro veces la altura media del árbol semillero no suele encontrarse más de un 10 % de la semilla hallada bajo la copa. Las distancias medias de diseminación para las principales especies forestales varían entre 30 y más de 50 m. Con velocidades medias de viento superiores a 1,7 m/s pueden aumentar estas distancias entre dos y tres veces.

La **edad de la masa** también influirá en la fructificación. Siempre deberán ser consideradas en la planificación de la selvicultura las edades en las que comúnmente las especies forestales suelen presentar las máximas fructificaciones en lapsos de tiempo regulares. Adaptando las cortas de regeneración a los ciclos y años de máxima fructificación se podrán aumentar notablemente las probabilidades de conseguir una regeneración exitosa.

### II.3.5.3. **Condiciones de germinación**

Dentro de la cadena de factores con influencia en la regeneración natural se resalta la importancia de que en el suelo se den condiciones favorables para la germinación de las semillas. Entre los motivos más reseñables por los cuales puede llegar a ser fundamental la realización de ayudas complementarias sobre el suelo para mejorar las condiciones de germinación se destacan los siguientes:

- Desecación
- Falta de toma de contacto de la semilla con el sustrato
- Predación

- Pudrición de semillas
- Excesiva compactación del suelo
- Competencia

Las estrategias comúnmente seguidas por el selvicultor para mejorar las condiciones de germinación son:

a) Aumentar la capacidad de retención del suelo y disminuir la compactación del mismo. De esta forma, al estar el lecho más mullido y menos compacto, las condiciones de humedad serán más favorables para la germinación y las radículas de los brinzales encontrarán un medio más propicio para su desarrollo. Altas temperaturas e insolaciones pueden, entre otros, ser responsables de excesivas compacidades en el suelo que limitan el desarrollo de las plántulas. Este fenómeno, frecuente en el entorno mediterráneo, unido con la irregularidad climática, hace fácil entender que muy a menudo sea decisivo para garantizar la regeneración natural actuar con medios mecánicos sobre el suelo.

En aras a evitar pérdidas de suelo y daños edáficos será necesario evaluar con precisión los riesgos erosivos que estas actuaciones puedan ocasionar, limitando las superficies y época de actuación y las profundidades de labor. Esta última coincidirá con la época de diseminación de las semillas de las especies a regenerar. De esta forma se evita dejar el suelo al descubierto más tiempo que el necesario a la vez que se garantiza al máximo el éxito de la regeneración.

En zonas con pendiente y grave riesgo erosivo, si la actuación sobre el suelo fuera necesaria para garantizar la regeneración, será conveniente evaluar la adecuación de recurrir a la regeneración artificial mediante actuaciones puntuales. Si esto no se hiciese, será obligado actuar por fajas o bandas paralelas a las curvas de nivel. Estas fajas estarán siempre rodeadas de vegetación arbórea para permitir una máxima protección al suelo. Esta consideración es igualmente válida en zonas en las cuales sean de esperar alteraciones edáficas negativas debidas a un exceso de insolación sobre el suelo, a un aumento desmedido de las temperaturas a nivel del suelo y a la escasez de precipitación.

Por último, será preciso analizar en cada caso concreto las consecuencias edáficas de una inversión de horizontes. Para ello frecuentemente un análisis visual del perfil del suelo puede bastar para elegir un tipo u otro de actuación sobre el suelo o para rechazar cualquier intervención. En general, labores superficiales de binado (profundidad de labor <

20 cm) suelen ser suficientes para mejorar las condiciones de germinación al tiempo que se reduce el riesgo de provocar un negativo rejuvenecimiento edáfico del suelo.

Una vez producida la diseminación puede también llegar a ser necesario enterrar las semillas con ayuda de gradas de discos o escarificadores para así facilitar la toma de contacto de la semilla con el lecho y aumentar de esta forma las condiciones de germinación. Este punto alcanza cierta importancia con semillas pesadas como las bellotas o los hayucos.

b) *Aceleración de la mineralización*: acumulaciones de mantillo y humus pueden ocasionar pérdidas importantes en la germinación de las semillas. Para vencer este problema es a menudo necesario realizar actuaciones sobre el suelo que aceleren la incorporación mineral. El ejemplo más característico está en umbrías en hayedos en fuerte espesura sobre suelos pobres en nutrientes y de poca profundidad. En ellos comúnmente se producen acumulaciones de hojarasca y de humus bruto tipo moder. La realización de tratamientos sobre los horizontes superficiales del suelo permitirá mezclar el humus o el mantillo con el suelo mineral. De esta forma, con ligeras actuaciones sobre el suelo, se crean condiciones favorables para la germinación acelerándola y evitando así ataques de parásitos sobre los frutos, pudriciones o desolaciones de los mismos, favoreciéndose al mismo tiempo la incorporación de la materia orgánica sin descomponer. Otra forma de evitar la acumulación de hojarasca en el suelo consiste en permitir un mayor acceso de luz mediante la aplicación de claras con lo que se propicia la más rápida incorporación de la materia orgánica

c) *Mejora del drenaje*: condiciones de encharcamiento prolongadas en el suelo - estrechamente ligadas con el régimen de precipitaciones, riesgo de inundación y textura del suelo - pueden producir en muchas especies importantes pérdidas de semilla asociadas comúnmente a problemas de asfixia o pudrición. Los métodos más comúnmente utilizados para evitar problemas de encharcamientos son los subsolados.

#### **II.3.5.4. Ecofisiología de la especie**

La probabilidad de una plántula de desarrollarse en determinado sitio es el producto de las condiciones ambientales abióticas y bióticas que la rodean en interacción con sus propias características morfo-fisiológicas. En este apartado se analizarán brevemente las principales características ecofisiológicas que hacen que

una especie, en el estadio de brinzal, pueda crecer o no bajo determinadas condiciones de sitio, en particular, aquellos con algún tipo de estrés ambiental, ya sea por déficit o exceso lumínico, y déficit hídrico. Además de éstos, existen otros factores ambientales que limitan el establecimiento de una planta, tales como niveles inadecuados de nutrientes o salinidad, a los que aquí no nos referiremos.

Desde los inicios de la silvicultura se ha percibido que hay especies que requieren ciertos niveles de sombreado para regenerar mientras que otras pueden hacerlo en sitios abiertos (temperamento). Un comportamiento y otro están ligados básicamente a distintas capacidades de la planta de resistir condiciones desfavorables en su balance hídrico, aún en sitios con abundante agua, las que se pueden generar al permanecer con sus estomas abiertos en una atmósfera desecante. Esto ocurre por el hecho de que la fijación de carbono, que requiere radiación como fuente primaria de energía, está inexorablemente ligada a la pérdida de agua a través de los mismos orificios –estomas- por donde entra uno y sale el otro gas (C y vapor de agua). Las plantas pueden lidiar con los problemas que esto supone a través de distintas adaptaciones –o aclimataciones, si ocurren dentro del período de vida del individuo (ontogenia) - a nivel fisiológico, morfológico o ecológico. Así, por ejemplo, una especie puede resistir mejor el estrés hídrico si lo evita con un sistema de conducción de agua muy eficiente, si accede a una fuente estable de agua en el suelo con raíces profundas, si posee hojas de forma tal que se minimicen las pérdidas de agua; o bien, simplemente puede evitar el estrés, o minimizarlo, regenerando en ambientes menos estresantes (bajo sombra), es decir, ocupando un nicho ecológico diferente. Tal vez, el ocupar sitios menos estresantes pueda parecer la solución más fácil; sin embargo, la sombra impone el compromiso entre estar en un ambiente menos desecante pero a la vez, con menores posibilidades de fijar carbono por deficiencia de radiación. En sitios muy umbríos, el balance hídrico puede ser muy favorable para el brinzal, pero es posible que tampoco allí pueda crecer debido a un balance de C muy desfavorable. Sin embargo, así como las especies han desarrollado adaptaciones para resistir condiciones de estrés hídrico, también existen estrategias morfo-fisiológicas y bioquímicas que optimizan la captación de radiación y fijación de C en condiciones de sombra.

Para poder funcionar una planta requiere que el agua dentro de sus células se encuentre dentro de determinados valores de potencial hídrico, que es una

medida de cuán retenida está la misma y por lo tanto, su capacidad de realizar trabajo. Por debajo de ciertos niveles de esta variable, se inhibe cualquier proceso fisiológico. De esta manera, una planta debe tener la capacidad de llevar agua desde el suelo hasta las hojas a medida que ésta se evapora y evitar así valores de potencial hídrico muy negativos en los tejidos foliares debido a la deshidratación. Esto supone un verdadero desafío en las especies leñosas que, en algunos casos, deben ascender agua en contra de una serie de resistencias, hasta decenas de metros de altura. Para poder hacerlo, la planta está inmersa en un continuo suelo-planta-atmósfera que no es más que un gradiente de potencial hídrico a través del cual el agua se mueve, desde sitios con potenciales hídricos más cercanos a cero (el suelo) hasta los más negativos (la atmósfera). Al igual que en un circuito eléctrico, el agua se mueve con una determinada conductancia gracias a una diferencia de nivel energético (diferencia de potencial hídrico). La conductividad hidráulica de la planta es la inversa de una suma en serie de múltiples resistencias impuestas al pasaje de agua, comenzando por la entrada a la raíz, el ascenso a través de los vasos del xilema, cada peciolo, el mesófilo de la hoja, etc. Cuanto mayor capacidad de conducción (menos resistencias) posea un individuo, más fácilmente podrá proveer agua a las hojas, más tiempo podrá permanecer con sus estomas abiertos, y por lo tanto, más C podrá fijar. A su vez, el agua asciende gracias a la cohesión existente entre las moléculas que conforman la columna de agua dentro de los elementos del xilema, cohesión que puede romperse si se somete a la columna a determinados niveles de tensión. Este fenómeno se conoce como "cavitación" (Tyree & Sperry, 1989) y conlleva pérdidas de conductividad hidráulica, que en definitiva disminuyen la capacidad de la planta de permanecer con sus estomas abiertos. Por ello, una de las estrategias que tienen algunas especies para resistir el estrés hídrico consiste en poseer una madera cuyos elementos del xilema son poco vulnerables a la cavitación, lo cual se logra mediante modificaciones anatómicas en los mismos (e.g. Sperry et al, 2006).

Asimismo, algunas especies toleran mayores condiciones de estrés hídrico mediante su capacidad de ajuste osmótico, es decir, favoreciendo la entrada de agua en las células y el mantenimiento de su turgencia mediante concentración de osmolitos en las mismas.

A nivel morfológico, las plantas aumentan la eficiencia de conducción y minimizan las probabilidades de desarrollar balances hídricos desfavorables

mediante cambios en la asignación de biomasa entre estructuras aéreas y subterráneas (mayor cantidad y/o profundidad de raíces y menor superficie transpiratoria) y en la proporción de Huber (relación entre superficie foliar: superficie de conducción), cambios en la forma de las hojas, aparición de pilosidades, etc. (para más detalle sobre estrategias de resistencia a la sequía, ver por ej. Valladares et al. 2004a).

Por otro lado, en un ambiente abierto con máxima radiación, cuando la planta cierra sus estomas para evitar la desecación, el exceso de fotones puede provocarle daños de distinta magnitud y reversibilidad por la denominada “fotoinhibición” (e.g. Long et al, 1994). Debido a ello, las especies que toleran condiciones de pleno sol poseen estrategias que le permiten evitar excesos de luz en horas de máxima radiación (hojas con ángulos cercanos a la vertical), o bien disipar el exceso de energía mediante sustancias apropiadas (ej. carotenoides).

Como se mencionó, la regeneración bajo sombra implica el desarrollo en ambientes que pueden ser más favorables desde el punto de vista hídrico (aunque no siempre es así, Valladares & Pearcy, 2002), pero a la vez suponen una desventaja desde la disponibilidad de radiación. Las plantas que toleran condiciones de sombra pueden tener bajas tasas de respiración en oscuridad, así como cambios a nivel bioquímico y morfológico que optimicen la captación de radiación. En el primer caso, se ha visto que especies que crecen a la sombra poseen más clorofilas (etapa de captación de luz de la fotosíntesis). Desde el punto de vista morfológico, los individuos que toleran la sombra tienden a poseer mayor área foliar específica (superficie foliar más grande por unidad de peso de la hoja), y mayor proporción de hojas en relación con las raíces y la cantidad de xilema conductivo. Estos cambios ocurridos para maximizar la captación de radiación van en detrimento de la capacidad conductiva de agua de la planta, lo que le confiere desventajas ante condiciones de déficit hídrico. Debido a esto, en general, el poder resistir deficiencias de agua y de luz supone estrategias contrarias que redundan en un verdadero desafío para una planta que crece con ambos tipos de estrés, como puede ocurrir en un bosque de zonas mediterráneas (Valladares et al, 2004b).

Si bien el silvicultor no está en condiciones de modificar las características ecofisiológicas de una especie (excepto que siembre o plante material genético mejorado), el conocimiento de las mismas permite orientar las prácticas de intervención que optimizan las condiciones ambientales para su desarrollo.

### **II.3.5.5. Vegetación competitiva**

La vegetación competitiva puede tener incidencia negativa en el desarrollo de la regeneración al competir directamente con los jóvenes brinzales o impedir su germinación. Por otro lado, esta vegetación puede llegar a dar protección física (efecto facilitación) a los brinzales (heladas, insolación excesiva, etc.). De estimarse limitante la presencia de vegetación competitiva los tratamientos a aplicar podrán ser:

- Desbroce manual
- Fitocidas
- Aperos agrícolas
- Control de vegetación mediante manejo previo de ganado
- Fuego prescrito
- Manejo previo de la espesura

### **II.3.5.6. Predación por herbívoros**

Una de las causas más importantes para explicar el fracaso de muchas cortas de regeneración está en la predación por herbívoros domésticos y silvestres. La ganadería extensiva en los montes es una realidad recurrente en distintos tipos de bosque. Los acotamientos físicos al pastoreo son necesarios para la regeneración arbórea pero ocasionan frecuentes conflictos con los productores ganaderos. La regulación del pastoreo es complicada al confrontarse distintos intereses. La ejecución de mejoras silvopastoriles en otras partes del monte incrementa la querencia del ganado hacia estas zonas y puede ser una interesante medida para disminuir el efecto de los herbívoros sobre la regeneración.

Por otro lado, la lignificación del paisaje trae consigo un aumento de las poblaciones de herbívoros silvestres los cuales también comienzan en muchas zonas a tener trascendente incidencia en la regeneración. El control de las poblaciones de herbívoros (como el ciervo o el guanaco) a través de la regulación de la actividad cinegética es probablemente la única medida de eficacia.

### **II.3.5.7. Restos de corta**

La existencia de restos de corta puede limitar el éxito de la regeneración al (a) impedir la toma de contacto de la semilla con el suelo mineral, (b) limitar el desarrollo de los brinzales y (c) suponer un riesgo de incendio. Por otro lado, la presencia de restos de corta de reducido diámetro crea sobre el suelo un efecto pantalla (efecto mulch) que puede ser positivo para el brinzal al aportar protección física al terreno (erosión, desecación, sobrecalentamiento estival, etc.), evitar la invasión de vegetación competidora y limitar el acceso de los herbívoros. En los restos de corta, por otro lado, se encuentra una importante cantidad de nutrientes de fácil incorporación por lo que su presencia repercute positivamente en el crecimiento de los brinzales. En general se puede concluir que el mantenimiento de restos de corta contribuye a disminuir el impacto de los tratamientos silvícolas de regeneración.

Debido a que el tratamiento de los restos de corta es un proceso de elevado coste deberá buscarse el equilibrio entre las funciones beneficiosas y las limitaciones y riesgos que supone su mantenimiento (especialmente en lo referente a plagas y enfermedades e incendios).



### III. LOGICA DEL MODELO- PRINCIPALES RELACIONES

#### III.1. RELACIONES LOGICAS ENTRE MODULOS Y VARIABLES

El modelo *Brinzal v.1.0* es un modelo semi-empírico de simulación de la fijación de C, y su acumulación en biomasa, a lo largo de un día para brinzales de cualquier especie leñosa. Este último aspecto es importante debido a que, a nivel ecofisiológico, la fijación de C está limitada por variables hidráulicas. El modelo ha sido concebido con fines docentes de manera de mostrar las principales relaciones existentes entre las características ecofisiológicas de una especie en el estadio de brinzal y el manejo del bosque por encima del mismo, que determinan el crecimiento y/o supervivencia del renewal. El modelo general se divide en tres módulos: Suelo y Clima, Características del bosque y su silvicultura, y Regeneración (Fig. 1). El módulo de regeneración es mecanístico en varias de las relaciones que plantea, relacionando la fijación de C y el flujo de agua en la planta, representado éste por un modelo hidráulico sencillo propuesto por Bond & Kavanagh (1999). Los otros dos módulos presentan relaciones empíricas entre variables.

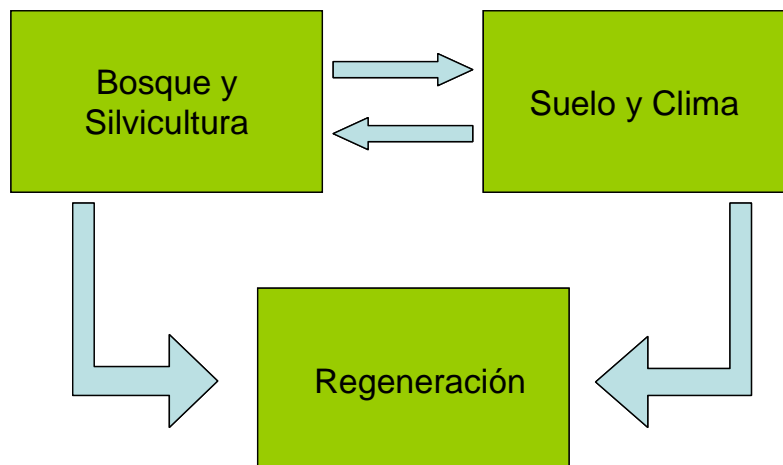


Fig. 1: Esquema general del modelo de simulación mostrando los tres módulos y las relaciones entre ellos.

Tal como está concebido el modelo, en el módulo de Bosque y Silvicultura, el bosque puede describirse a través de la estructura diamétrica del mismo (número de árboles en cada clase diamétrica por hectárea), y pueden realizarse las siguientes prácticas de manejo: extraer (o hipotéticamente, agregar) árboles en las distintas clases de edad, modificar la Relación de Huber de los mismos (simulando una poda de ramas verdes), realizar control de la vegetación del sotobosque en distintas proporciones, y dejar más o menos altura de restos de corta. El modelo estima la superficie ocupada por las copas y el área foliar de los árboles, calculando el índice de área foliar (IAF) del componente arbóreo. Todas las prácticas de manejo mencionadas influyen sobre las condiciones microclimáticas que experimenta el brinzal: el IAF del componente arbóreo influye sobre la cantidad de arbustos y pastos, sobre la cantidad de agua efectiva que llega al suelo luego de una lluvia, sobre la cantidad de luz que llega al sotobosque, y sobre la demanda evaporativa. A éste último efecto también contribuyen los restos de corta. A su vez, el ambiente lumínico del brinzal (determinado por el IAF sobre el mismo) influye sobre su asignación de biomasa (relación de Huber) si el mismo posee plasticidad morfológica, y sobre sus parámetros fotosintéticos, si tiene plasticidad fisiológica. La cantidad de luz que llega al brinzal es la que determina, en combinación con el estado hídrico de la planta y los efectos de fotoinhibición, su fijación de C. A su vez, la cantidad de radiación que llega al suelo determina la temperatura del mismo, la que a su vez influye (si la planta es pequeña) sobre la conductividad hidráulica del tallo.

El módulo de Suelo y Clima posee como principales variables que influyen sobre el brinzal de forma directa, el contenido de agua en el suelo, la radiación disponible y el déficit de presión de vapor de la atmósfera. El contenido de agua en el suelo depende de un valor inicial impuesto por el usuario más el aporte por lluvias efectivas. A su vez, la presencia de pastos genera interacciones de competencia por recursos hídricos, influyendo negativamente sobre la cantidad de agua en suelo disponible. Esta influencia negativa sobre la disponibilidad de agua efectiva para el brinzal sólo aplica cuando éste tiene una altura menor a 15 cm. Para brinzales de mayor tamaño, el modelo asume que posee un sistema radical más profundo que le permite escapar a la competencia directa con los pastos. El valor máximo y mínimo de agua en suelo quedan limitados a los correspondientes para cada textura de suelo (arenoso, arcilloso, limoso, o una textura definida por el usuario), asumiendo

que toda agua que excede la saturación del suelo, drena y se va del sistema. Mediante el modelo de van Genuchten (1980), se estima el potencial hídrico del suelo para cada valor de contenido de agua del mismo, considerando la textura. Los parámetros de este modelo se brindan por defecto para los 3 tipos principales de suelo, aunque el usuario puede proveer los correspondientes a su tipo de suelo particular. Para ello, se brinda acceso a un anexo con el programa Rosetta (Schaap M, 1999) que permite estimar los parámetros requeridos en base a la textura (proporción de limo, arcilla, arena).

La radiación disponible es un promedio de esta variable a nivel espacial, estimada por la fórmula de Beer-Lambert a partir de la radiación real y el IAF por encima del brinzal. El modelo en su versión actual (v 1.0) no explicita la variable espacial, por lo que no se distingue entre claros o zonas directamente bajo las copas.

El déficit de presión de vapor (DPV) es una de las variables conductoras del modelo hidráulico, la cual determina el grado de apertura estomática del brinzal. Este depende de la temperatura del aire y de la humedad relativa del mismo, asumiendo que la temperatura de la hoja es igual a la del aire. A su vez, el DPV real es modificado por la presencia de árboles-arbustos y restos de corta mediante una relación empírica hipotética: cuanto mayor es la cobertura de protección las condiciones microclimáticas se atemperan, reduciéndose levemente las temperaturas máximas e incrementándose las mínimas.

El modelo también requiere el dato de precipitación media anual y temperatura media mensual, en base a lo que estima una evapotranspiración potencial (EVT) para el sitio. En esta versión, la precipitación anual se utiliza para limitar el máximo IAF que puede alcanzar el sistema. Asimismo, el cociente entre ésta y la EVT, determina si se está en un sitio con o sin déficit hídrico, y por lo tanto, qué tipo de ecuación relaciona los árboles con los pastos. En sitios con déficit hídrico, se plantea una relación de facilitación de los árboles sobre el desarrollo (IAF) de pastos a valores bajos de IAF de los árboles, mientras que en sitios con abundante disponibilidad de agua, la presencia de árboles siempre tiene un efecto negativo (lineal) sobre los pastos. En ambos casos, por encima de cierto IAF de árboles-arbustos, el IAF de los pastos se hace cero. En esta primera versión, el cociente precip/EVT se realiza en base a valores anuales; futuras mejoras del

modelo permitirán distinguir si el déficit hídrico ocurre o no dentro de la estación de crecimiento.

Finalmente, el módulo de Regeneración es el que corre de acuerdo a los parámetros fisiológicos-morfológicos del brinzal y de las condiciones microclimáticas impuestas por el clima-suelo y modificadas por la presencia de los distintos componentes de vegetación. La capacidad de fijar carbono de la planta (asumiendo al brinzal como una "gran hoja" (modelo de tipo "Big Leaf") depende de su curva de Fotosíntesis vs Radiación (parámetros de asimilación máxima, punto de compensación lumínico y rendimiento cuántico), la que se ve modificada por tres limitaciones: térmica, estomática y de fotoinhibición. La limitación térmica es una ecuación de óptimo, que permite introducir los efectos negativos de bajas y altas temperaturas sobre las tasas de fotosíntesis. La limitación estomática relaciona linealmente el grado de apertura estomática, que se estima por el modelo hidráulico, con la tasa de asimilación máxima de la planta. El efecto de fotoinhibición es una relación empírica hipotética que limita la fotosíntesis máxima a altos valores de radiación. La forma de esta limitación, así como las otras, puede ser modificada por el usuario, de manera de simular especies con mayor o menor sensibilidad a las variables mencionadas.

El carbono fijado por unidad de superficie foliar se traduce a toda la planta en base al área foliar de la misma. Esta depende de la altura del brinzal, dato que introduce el usuario. Parte de este carbono se pierde por respiración de mantenimiento, tasa que depende de la temperatura del aire y de la sensibilidad a la misma por parte de la especie (dada por el parámetro  $Q_{10}$ ). La fijación neta de C (fotosíntesis menos respiración) se traduce a tasa de crecimiento, que se acumula en biomasa de la planta. Parte del C también se resta debido a la respiración de crecimiento, que depende de la temperatura y de la cantidad de nuevo C incorporado a la planta. Finalmente, en base a la partición de biomasa de la especie, se estima la nueva biomasa aérea de la planta.

Como se mencionó, la fijación de C depende del grado de apertura estomática. Esta depende de la conductividad hidráulica foliar específica del brinzal ( $K_l$ , que es una medida de su capacidad de llevar agua desde el suelo a las hojas), del gradiente de potencial hídrico ( $\psi$ ) que se origina entre las hojas y el suelo, y del déficit de presión de vapor entre las hojas y el aire (DPV, ecuación 1 que presenta

relaciones muy simplificadas, asumiendo un total acoplamiento entre la transpiración y el DPV del aire debido a una conductancia aerodinámica muy elevada):

Flujo de agua en fase líquida=  $Kl (\psi_{\text{hoja}} - \psi_{\text{suelo}})$

Flujo de agua en fase vapor =  $gs \text{ DPV}$

En el equilibrio, ambos flujos son iguales, por lo que se igualan los segundos términos y se puede estimar la  $gs$ :

$$gs = Kl (\psi_{\text{hoja}} - \psi_{\text{suelo}}) / \text{DPV} \quad \text{Ec. 1}$$

El primer gradiente ( $\psi_{\text{hoja}} - \psi_{\text{suelo}}$ ) permite el ascenso de agua en contra de la resistencia que brinda todo el pasaje de agua desde el suelo a las hojas (inversa de  $Kl$ ) y el segundo gradiente ( $\text{DPV}$ ), es el que determina que el agua salga a la atmósfera en fase vapor, en una tasa dada por la conductancia estomática ( $gs$ ). Sin embargo, ninguno de estos parámetros es fijo a lo largo del día, ya que la planta inserta en el continuo suelo-planta-atmósfera sufre permanentes cambios de potencial hídrico y de  $gs$  (uno depende del otro), así como de la misma  $Kl$ . La  $Kl$  es la conductividad hidráulica específica ( $Ks$ ) ponderada por la cantidad de hojas de la planta. La  $Ks$  es una medida de la capacidad de la madera (xilema activo) de la planta de conducir agua, la que puede bajar a lo largo del día si las columnas de agua dentro del xilema son sometidas a demasiada tensión. En este momento, la columna de agua “cavita”, disminuyendo la  $Ks$ . La mayoría de las especies leñosas operan dentro de un rango de apertura estomática tal que el potencial hídrico (tensión) no conduzca a pérdidas importantes de  $Ks$  y grados de cavitación irreversibles. Por el mismo modelo, la tensión alcanzada (mínimo potencial hídrico) depende a su vez de la  $Ks$  (cuanta mayor sea la resistencia, mayor será la tensión), y de los extremos del gradiente: potencial hídrico del suelo y  $\text{DPV}$ . Cuanto menor sea el primero (suelo más seco) y/o mayor sea el segundo, la tensión en el xilema será mayor, obligando a la planta a cerrar sus estomas más tempranamente. La susceptibilidad del xilema a cavitarse ante valores crecientes de tensión (valores más negativos de potencial hídrico) depende de la especie (del órgano en realidad), siendo esta relación posible de ser modificada por el usuario de manera de simular especies más y menos vulnerables a la cavitación.

Como se mencionó, la KI es la Ks ponderada por el área foliar. Una manera de aumentar la eficiencia de conducción de agua es disminuir la proporción de hojas a ser alimentada por una determinada cantidad de xilema activo (bajar la relación de Huber). Sin embargo, bajo condiciones de sombra, y para aumentar la superficie de captación de luz, las plantas tienden a aumentar la asignación de biomasa a superficie foliar, creándose un compromiso cuando coexisten condiciones de sombra y déficit hídrico. En el modelo, si la especie es plástica, su relación de Huber aumenta (más hojas) a medida que aumenta el grado de sombreado.

### III. 2. VARIABLES INTERVINIENTES Y UNIDADES

#### III. 2.1. Módulo Suelo y Clima

Variables que puede ingresar el usuario (el programa ofrece valores por defecto):

- Temperatura: del aire a lo largo del día de simulación, °C
- Humedad Relativa del aire, a lo largo del día de simulación, %
- Lluvia: lluvia que cae el día de la simulación o previamente y que se agrega al agua en suelo existente, mm
- Precipitación media anual: en mm.
- Temperatura promedio de cada mes: en °C.
- Valor inicial agua en suelo: contenido de agua en el suelo al inicio de la simulación, %en volumen (0-1, 1=100%)
- Radiación solar: se refiere a la fracción fotosintéticamente activa (aprox. 50% de la total),  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{seg}^{-1}$
- Coeficiente de extinción de luz: se refiere al coeficiente de la fórmula de interceptación de luz en función del índice de área foliar (IAF) de Beer-Lambert, adimensional.
- Profundidad de suelo, en cm.

Variables que estima el modelo:

- Déficit de presión de vapor real, kPa
- Déficit de presión de vapor brinzal, kPa. Es la demanda atmosférica en la micro-atmósfera en donde se encuentra el brinzal modificada por la presencia de árboles o restos de poda.
- Déficit de presión de vapor  $\text{mol mol}^{-1}$ , representa la demanda atmosférica expresada en dichas unidades.
- Índice de calor anual: necesario para estimar evapotranspiración potencial
- T media anual, en °C.
- Exponente ecuación Thornthwaite
- Evapotranspiración potencial anual, mm
- Pendiente: pendiente de la ecuación que relaciona el IAF y altura de restos de corta con el DPV que experimenta el brinzal.
- Contenido de agua en suelo: contenido de agua en el suelo al inicio de la simulación ponderado por la profundidad de suelo, más la lluvia efectiva (mm) y menos el agua transpirada por los pastos.
- Radiación disponible: radiación solar que llega al suelo luego de pasar por el follaje,  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{seg}^{-1}$
- Potencial agua en suelo: MPa
- Lluvia efectiva: precipitación que llega al suelo luego de pasar por el follaje, mm
- Interceptación de lluvias: cantidad de agua que queda en el follaje del bosque, proporción (0-1)
- Temperatura del suelo, en °C, estimada a partir de la radiación disponible.
- Contenido de agua en el suelo a saturación y contenido de agua residual: son parámetros dependientes de cada tipo de textura de suelo (valores máximo y mínimo).
- a: parámetro que permite estimar potencial hídrico del suelo a partir de su contenido de agua, es dependiente de la textura del suelo
- b: ídem que "a".
- h suelo arenoso-limoso-etc: altura de cabeza en función del contenido de agua de distintas texturas de suelo, este valor luego se traduce a potencial hídrico en MPa.

- Agua disponible limoso-arcilloso-etc: limita el contenido de agua en suelo por encima del agua residual de cada tipo de suelo y por debajo de su capacidad de campo.

### III. 2.2. Módulo Regeneración

Variables que puede ingresar el usuario (el programa ofrece valores por defecto):

Parámetros de la curva que relaciona la fotosíntesis neta con la radiación:

- PC: punto de compensación lumínico,  $\mu\text{mol fotones m}^{-2}\text{seg}^{-1}$
- RC: rendimiento cuántico,  $\mu\text{mol CO}_2 (\mu\text{mol fotones})^{-1}$
- Amax: fotosíntesis máxima,  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{seg}^{-1}$
  
- Plasticidad fisiológica: si-no, indica si la planta posee plasticidad fisiológica que le hace variar una cierta proporción de Amax y PC en función del ambiente lumínico.
- Relación parámetro fotosíntesis-PAR: ecuación que indica cuánto se modifican (0-1) los parámetros fotosintéticos Amax y PC de acuerdo al ambiente lumínico (determinado por el IAF por encima de los brinzales)
- Limitación estomática: reducción de Amax por limitaciones del estoma, proporción (0-1)
- Efecto de fotoinhibición: reducción de Amax debida a este proceso, para distintos valores de radiación, entre 0 y 1.
- Limitación térmica a fotosíntesis: limitación sobre la Amax impuesta por la temperatura del aire (función de óptimo), entre 0 y 1.
- gs mínima: mínima conductancia estomática,  $\text{mol m}^{-2}\text{seg}^{-1}$
- gs máxima: máxima conductancia estomática,  $\text{mol m}^{-2}\text{seg}^{-1}$
- Umbral radiación de apertura estomática: mínimo nivel de radiación necesario para la apertura estomática,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .
- Ks máxima: conductividad hidráulica específica máxima del brinzal,  $\text{kg MPa}^{-1} \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$



- Potencial pérdida 50%: potencial hídrico de la planta, en MPa, al cual se pierde el 50% de la Ks.
- Pendiente de la curva de cavitación: pendiente de la curva sigmoidea que relaciona el porcentaje de pérdida de Ks con el potencial hídrico de la planta, adimensional.
- Relación KI- temperatura de suelo: función que relaciona la conductividad hidráulica foliar específica y la temperatura del suelo, la segunda limitando la primera, entre 0 y 1.
- Umbral de mínima Ks: mínima Ks que normalmente experimenta la especie producto de su capacidad regulatoria (hay especies que pierden hasta un 30% de Ks durante el día, otras, conservativas, no llegan a perder nada de Ks antes de cerrar sus estomas).
- Relación de Huber: proporción de área foliar: área de xilema activo (diám basal) del brinzal, adimensional ( $m^2 m^{-2}$ )
- Plasticidad morfológica: si-no, si la planta posee plasticidad de este tipo se modifica la relación de Huber (asignación de biomasa) en cierta proporción de acuerdo al ambiente lumínico.
- Altura del brinzal: en cm
- Cálculo biomasa inicial: ecuación que relaciona la biomasa de la planta con su altura
- Relación parte aérea: subterránea: coeficiente de partición de biomasa a compartimentos aéreo (hojas más tallo y ramas) y radical.

Variables que estima el modelo:

- Amax real: fotosíntesis máxima limitada por la temperatura, la gs y la fotoinhibición,  $\mu mol m^{-2} seg^{-1}$
- Fotosíntesis: tasa de fotosíntesis neta en función de la luz recibida y con los parámetros de la curva asignados,  $\mu mol m^{-2} seg^{-1}$
- Fijación neta de carbono: fotosíntesis neta ponderada por el área foliar del brinzal, restada la respiración de mantenimiento, y llevada a intervalos de 15 minutos.
- Area foliar: del brinzal, estimada a partir de la altura del mismo,  $m^2$ .

- Respiración de mantenimiento:  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{seg}^{-1}$
- $Q_{10}$ : coeficiente que determina cuánto se modifican las tasas de respiración por cada 10°C que aumenta o disminuye la temperatura del aire.
- Crecimiento: depende de la fijación neta de C, multiplicado por 30 por cada C fijado que es el peso promedio de los carbohidratos. El crecimiento se acumula en la variable “biomasa final”.
- Biomasa final: suma el crecimiento a la biomasa inicial, la cual se estima a partir de la altura del brinzal, y resta la respiración de crecimiento, gr.
- Respiración de crecimiento: depende de la cantidad de nueva biomasa y de la temperatura del aire, gr C por nuevo gr de C.
- Biomasa aérea final: depende de la biomasa final y la proporción de ésta asignada a la fracción aérea del brinzal.
- Potencial hoja mínimo: potencial hídrico que se originaría en la hoja si ésta estuviese con los estomas completamente abiertos y con el DPV existente, MPa.
- Porcentaje de conductividad hidráulica: porcentaje de conductividad que se produciría en base al potencial mínimo estimado y la curva de cavitación de la especie.
- Conductividad hidráulica foliar específica real: se define en base a la KI máxima, el porcentaje de KI producido por la cavitación y la limitación a la KI producida por altas temperaturas de suelo, siempre que el producto de éstos no sea menor a la KI mínima que la planta experimenta usualmente (por debajo de ese valor, la planta cierra sus estomas para evitar embolismos catastróficos),  $\text{kg m}^{-1} \text{MPa}^{-1} \text{s}^{-1}$ .
- Conductancia estomática real: gs producida en base a la KI real, el DPV, el potencial hídrico del suelo y el potencial hoja (que no cae por debajo de un umbral dado por la máxima pérdida de KI que la planta experimenta),  $\text{mol m}^{-2}\text{seg}^{-1}$ .
- Potencial hoja real: potencial hídrico que se alcanza con la gs real, la KI real, el DPV y el potencial hídrico del suelo, MPa.

### III.2.3. Módulo de Características del bosque y silvicultura

VARIABLES QUE PUEDE INGRESAR EL USUARIO (EL PROGRAMA OFRECE VALORES POR DEFECTO):

- Relación Huber árboles adultos: proporción entre la cantidad de área foliar y área de xilema activo de los árboles adultos, adimensional. Valor necesario para estimar el área foliar del bosque a partir de su área basal.
- Clase diam 5 a 15, etc: número de árboles por hectárea en dicha clase diamétrica.
- Control de vegetación: si-no, indica si se realiza o no extracción de vegetación herbácea-arbustiva, y en qué proporción (0-1).
- Altura de restos de corta: altura de restos de ramas, hojas, tallos, presentes sobre el suelo, en cm.

VARIABLES QUE ESTIMA EL MODELO:

- Área total de copa clase 5 a 15, etc: superficie ocupada por las copas de los árboles en dicha clase diamétrica,  $m^2$ . Requiere una función que relacione el diámetro basal de cada árbol (cm) con el diámetro de su copa (m), para lo cual se asume una relación lineal y se solicita la pendiente e intercepto de dicha relación.
- IAF: índice de área foliar de cada estrato de vegetación,  $m^2 m^{-2}$ .
- Superficie de copas: suma de la superficie de copas de todas las clases diamétricas presentes en una hectárea,  $m^2$ .

## IV. GUIA DEL USUARIO DEL MODELO BRINZAL v. 1.0.

### IV.1. HERRAMIENTAS QUE UTILIZA EL PROGRAMA STELLA®

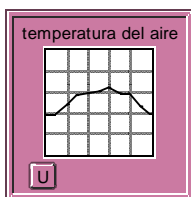
El modelo *Brinzal v.1.0.* ha sido desarrollado como una aplicación del programa Stella®. Para poder visualizarlo y hacerlo funcionar, el usuario puede utilizar este programa (cuya licencia deberá ser adquirida) o bien usar otro programa desarrollado por la misma empresa, de distribución gratuita, denominado Isee Player. El mismo puede ser bajado de internet. El programa Stella® brinda una serie de herramientas que permiten cambiar el valor de las variables antes de comenzar a correr el modelo. Las herramientas utilizadas en el modelo *Brinzal v. 1.0* son:



**Botón:** Se realiza la acción al hacer *click* sobre el mismo.

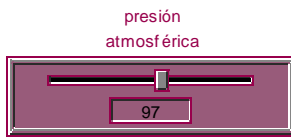


**Switch:** se utiliza para seleccionar una opción entre “sí” y “no”. En caso positivo, se encenderá una luz verde tal como en el *Switch* de Control de vegetación. La acción se realiza al mover la palanca o al hacer un *click* sobre el mismo, de acuerdo al formato del *Switch*.



**Gráfico:** Al hacer un doble *click* sobre este tipo de herramienta se abrirá una ventana que permitirá cambiar la gráfica. En caso de cambiarla, aparecerá una U en el ángulo inferior izquierdo que indica que se ha realizado un cambio con respecto a

los valores brindados por defecto. Al presionar sobre esta U, la gráfica volverá a tener la forma original (valores por defecto).



**Deslizador:** Es posible cambiar el valor inicial del parámetro haciendo correr la perilla del deslizador de manera horizontal. Observará que el número dentro del recuadro cambiará siguiendo el movimiento. Una U aparecerá en el ángulo inferior izquierdo indicando que se ha realizado un cambio con respecto al valor brindado por defecto.



**Reloj:** Permite cambiar el valor del parámetro haciendo girar la perilla. Una U aparecerá en el ángulo inferior izquierdo indicando que se ha realizado un cambio con respecto al valor por defecto.

Por otro lado, el programa Stella® posee dos herramientas para visualizar los resultados de las corridas del modelo: Tablas y Gráficos.

En el caso de las Tablas, es posible copiar una serie haciendo un *click* sobre el nombre de la variable. De esa manera, se observará que toda la serie cambia de color. Una vez que la serie cambia de color, oprimiendo al mismo tiempo las teclas CTRL y C podrá copiarse la serie. Es posible navegar por la tabla utilizando el deslizador que se encuentra debajo de la misma.

Para copiar un gráfico basta con hacer un *click* con el botón derecho del ratón para acceder a la opción "copiar".

## IV.2. UTILIZACIÓN DEL MODELO BRINZAL 1.0.

## IV.2.1. Menú Principal

El menú principal (figura 2) es la pantalla de presentación del modelo *Brinzal v. 1.0.* En ella, puede observarse el gráfico en donde se muestra la interrelación entre módulos, el listado de Autores e Instituciones, y una serie de botones que permitirán desplazarse por las distintas partes del modelo. Al hacer *click* en los siguientes botones, el usuario podrá ingresar a las pantallas que permitirán cambiar las condiciones de inicio de la corrida de simulación:

- Botón de “*Suelo y clima*”: permite ingresar las características del sitio (tipo de suelo, pluviometría, temperaturas medias, etc) y del día puntual de la simulación (contenido inicial de agua en suelo, temperatura, etc).
- Botón de “*Bosque y Silvicultura*”: permite cargar las características estructurales del bosque y el tipo de manejo del mismo.
- Botón de “*Regeneración*”: permite modificar variables morfológicas y fisiológicas de la especie en regeneración

Mediante el botón “*Correr modelo*” podrá darle inicio a la simulación. Gracias a los botones “*Ver resultados gráficos*” y “*Ver resultados en Tablas*”, los usuarios podrán observar el patrón de cambio de ciertas variables durante el día de simulación.

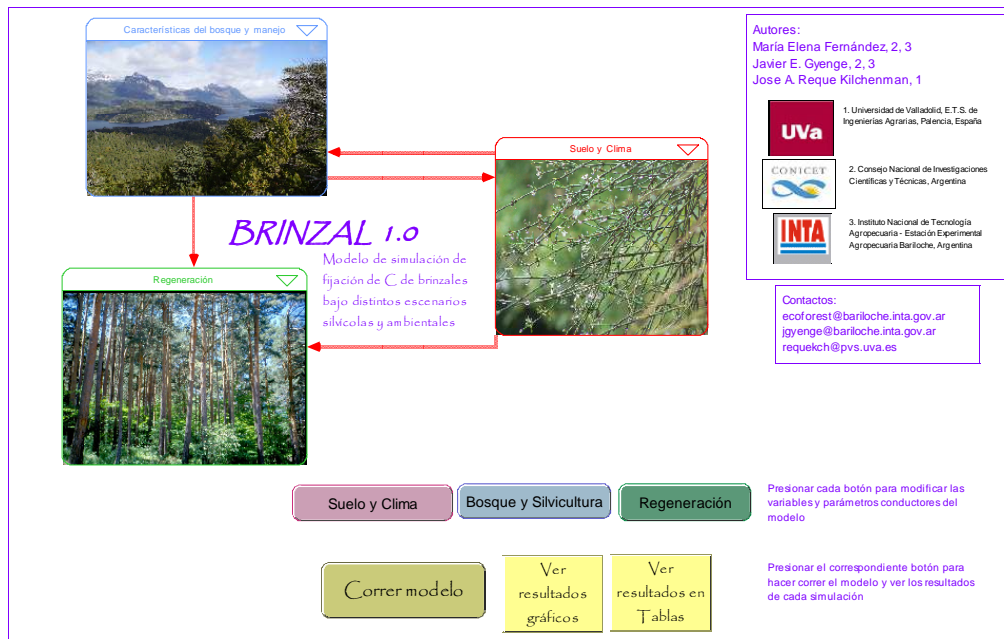


Figura 2: Página de presentación del modelo *Brinzal v.1.0.*, donde están los botones que permiten ir a las distintas pantallas de parámetros y resultados de la simulación.

## IV.2.2. Módulo Suelo y Clima

En la pantalla de dicho módulo (figura 3) podemos encontrar un botón que permite volver a la pantalla del Menú Principal (este botón se encuentra en todos los módulos y pantallas), y una serie de controles ubicados en dos cajas: Variables de sitio y Variables correspondientes al día de la simulación.

a- *Variables de sitio:*

Textura del suelo: el usuario podrá seleccionar entre cuatro tipos de suelos, indicando la luz verde la selección realizada. En caso de seleccionar “suelo usuario”, el mismo deberá consultar la Tabla anexa o utilizar el modelo Rosetta 1.0 (Schaap M, 1999) para estimar los siguientes parámetros del modelo de van Genuchten (van Genuchten, 1980): contenido de agua en el suelo a saturación, agua residual, y parámetros a y b (ver Anexo I). Dichos valores deberán ser ingresados en la Tabla “Parámetros del modelo van Genuchten” haciendo un *click* sobre el valor a reemplazar (el mismo cambiará de color al hacer el *click*).

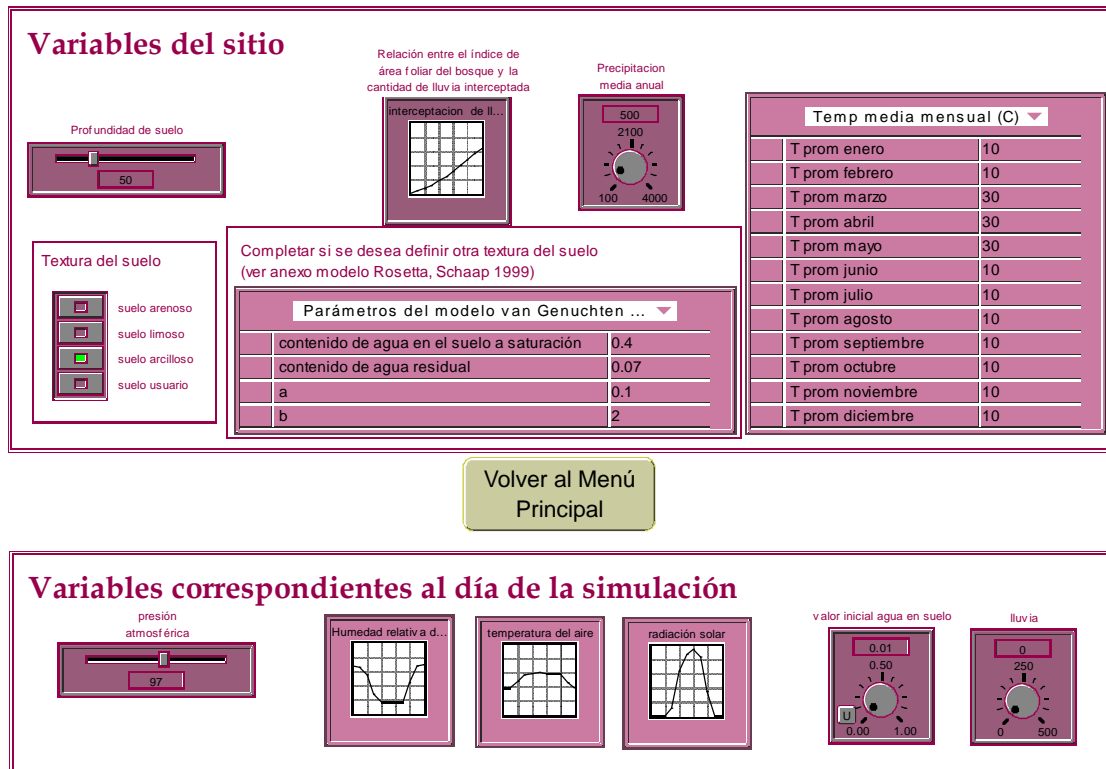


Figura 3: pantalla correspondiente a los parámetros del módulo Suelo y Clima.

Profundidad de suelo: El usuario podrá cambiar la profundidad del suelo del sitio. En este cuadro también se encuentra un reloj donde se puede elegir la Precipitación media anual del sitio y una Tabla en donde deben ingresarse los valores de Temperatura media mensual. Asimismo, en esta pantalla el usuario puede ingresar en forma gráfica la relación que indica el grado de interceptación de lluvias en función del IAF del dosel arbóreo.

b- *Variables correspondientes al día de la simulación.*

En este recuadro podemos observar una serie de herramientas que permitirán cambiar el valor inicial y el valor en cada momento de la simulación de las variables mencionadas. Tanto la presión atmosférica, el valor inicial del agua en suelo y la lluvia pueden cambiarse mediante el deslizador o los relojes, respectivamente. Por otro lado, una serie de gráficos permitirá variar el patrón diario de humedad relativa del aire, la temperatura del aire y la radiación solar.

#### IV.2.3. Módulo Bosque y Silvicultura

Como se mencionó, en este módulo se describen las características del bosque y se pueden simular distintas prácticas silviculturales, como extracción de árboles (p. ej. clara/ raleo) y ramas (poda).

Comenzando desde el ángulo superior izquierdo hacia la derecha de la pantalla (figura 4), observamos una Tabla donde el usuario deberá introducir el número de árboles presentes en cada clase diamétrica (desde individuos con diámetros a la altura del pecho (DAP) de entre 5 a 15 cm hasta aquellos con DAP superiores a 55 cm). A continuación, se encuentran dos relojes: aquel que permite cambiar el coeficiente de extinción de luz de la ecuación de Beer-Lambert; y el que posibilita cambiar la relación entre el área foliar y el xilema activo de la especie arbórea (relación de Huber árboles adultos). En la fila inferior de herramientas de Stella® encontramos una tabla en la que deben indicarse los parámetros de la regresión lineal que relaciona el diámetro de la copa con el diámetro basal de los árboles. A su derecha, se encuentra un reloj que permite introducir la altura de restos de corta o necromasa presente. Por último, en el siguiente cuadro observamos un *switch* que permite introducir un control de vegetación (actuación



sobre el sotobosque), y en caso de aceptar dicha opción, cuantificar la proporción de vegetación extraída.

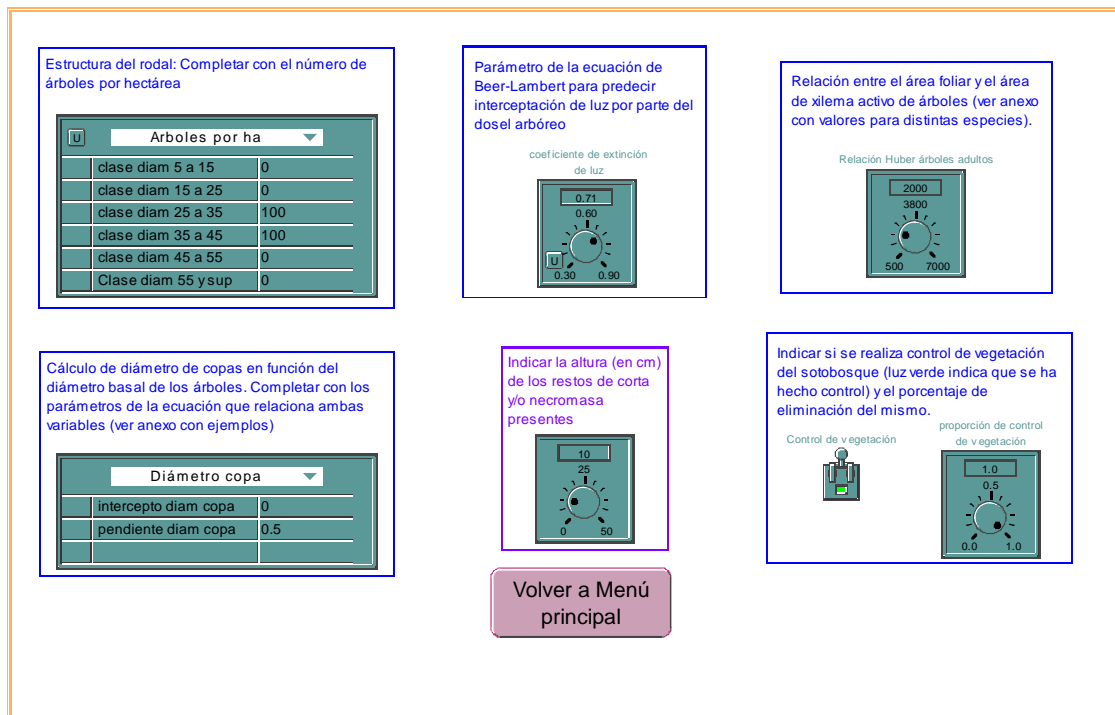


Figura 4: pantalla correspondiente a los parámetros del módulo Bosque y Silvicultura.

#### IV.2.4. Módulo Regeneración

A diferencia de los módulos anteriores, este Módulo posee dos pantallas: una relacionada con características ecofisiológicas (figura 5) y otra relacionada con la morfología del brinzal (figura 6). Valores de ambos tipos de parámetros se encuentran tabulados.

En la primera pantalla, en el ángulo superior izquierdo encontramos un recuadro con variables relacionadas con la fijación de carbono. En el mismo encontramos una tabla en donde se describen el valor de los parámetros de la curva que relaciona la fotosíntesis con la radiación fotosintéticamente activa: Asimilación máxima, Punto de compensación lumínico y Rendimiento cuántico. Por debajo de la misma se encuentran tres gráficos, los que representan las limitaciones sobre la Asimilación Máxima impuesta por la temperatura, el exceso de radiación y la conductancia estomática (limitación térmica, fotoinhibición y estomática,

respectivamente). En la parte inferior encontramos una tabla con el parámetro  $Q_{10}$ , relacionado con el cambio en la tasa de respiración en relación a la temperatura.

En el centro de la pantalla, existe un cuadro con dos *switch* que permiten determinar si el brinzal en cuestión posee plasticidad morfológica, fisiológica o ambas.


En el extremo derecho se encuentra un recuadro en donde se agrupan los parámetros relacionados con la arquitectura hidráulica del brinzal. En la primera tabla se agrupan los valores máximos y mínimos de conductancia estomática (gs máxima y mínima), la conductividad hidráulica máxima del xilema (Ks máxima) y los dos parámetros de la ecuación sigmoidea que relaciona la pérdida de Ks en relación a la tensión del xilema (curva de vulnerabilidad a la cavitación). Dichos parámetros son la pendiente de la curva de cavitación y el potencial agua en el cual se pierde el 50% de la Ks. Por debajo de la misma, encontramos un gráfico que relaciona la pérdida de conductividad hidráulica foliar específica (KI) con la temperatura del suelo. A la derecha, se observa un reloj que permite determinar el umbral de radiación (cantidad de radiación) necesaria para que se produzca la apertura de los estomas.

### Parámetros relacionados con la fijación de carbono


Curva de fotosíntesis vs. radiación fotosintéticamente activa (ver anexo con valores para distintas especies).

Parámetros fotosintéticos	
Asimilación máxima	20
Punto de compensación lumínico	15
Rendimiento cuántico	0.03


Limitación térmica sobre la Asimilación máxima



Limitación ejercida por la fotoinhibición sobre la asimilación máxima



Limitación estomática sobre la asimilación máxima



Respiración	
Q10	2

Indique si la especie presenta plasticidad fenotípica (luz verde indica que sí)

plasticidad morfológica

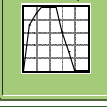
Plasticidad fisiológica

### Parámetros relacionados con la arquitectura hidráulica

Indique la conductividad estomática (gs) máxima y mínima, la conductividad hidráulica específica máxima (Ks), el mínimo valor relativo de Ks que experimenta la planta, y los parámetros de la curva sigmoidea que relaciona el porcentaje de pérdida de Ks con el potencial hídrico (\*)

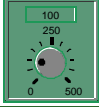
Parámetros hidráulicos	
gs máxima	0.5
gs mínima	0.01
Ks máxima	1
Umbral de mínima Ks	0.7
pendiente de la curva de cavitación	0.6
potencial pérdida 50% Ks	-3

Relación entre la conductividad hidráulica foliar específica (KI) y la temperatura del suelo superficial (\*)



Mínimo nivel de radiación fotosintéticamente activa necesaria para la apertura estomática (\*)

umbral radiación de apertura estomática



Volver al Menú Principal

Pantalla con parámetros de biomasa

Figura 5: pantalla correspondiente al módulo Regeneración, donde se presentan los parámetros ecofisiológicos del brinzal.

Por último, en la segunda pantalla se observa una Tabla que permite ingresar los parámetros morfológicos del brinzal (su relación de Huber, su altura y la relación entre su parte aérea y subterránea). A su derecha, mediante gráficos puede establecerse la relación entre la biomasa y el área foliar del brinzal con la altura del mismo.



Figura 6: pantalla correspondiente al módulo Regeneración, donde se presentan los parámetros morfológicos del brinzal.

#### IV.2.5. Pantallas de Resultados

En el Menú Principal se encuentran dos botones que permiten “viajar” a las pantallas en donde se muestran los resultados de manera gráfica o numérica (Tablas).

En el caso de *Brinzal v. 1.0.*, el modelo calcula las variables cada 15 minutos, desde las 0:00 hs hasta las 24:00 hs. Por ello, tanto las Tablas como los gráficos mostrarán un valor cada dicho intervalo de tiempo.

En el caso de los resultados en Tablas, las variables se agruparon entre aquellas con valores dinámicos a lo largo del día (dependientes de los cambios climáticos y microclimáticos, por ejemplo la radiación solar que llega al sotobosque y la demanda atmosférica) y aquellas que muestran un valor relativamente estable

durante el día pero que cambian por la estructura del bosque (por ejemplo, la cantidad de agua en el suelo), y además, también es posible observar los cambios en biomasa del brinzal. Para el primero de los casos, las filas representan las variables y las columnas el valor que adopta dicha variable para cada momento. En el segundo caso, las columnas muestran las variables.

En los Resultados gráficos, los mismos se agrupan en tres gráficas que presentan las variables relacionadas con la fijación de carbono, con el flujo de agua dentro de la planta y con las variables climáticas tanto por encima del bosque como a nivel microclimático experimentadas por el brinzal. En los mismos, cada variable se encuentra asociada con un color.

### **IV.3. DESCRIPCIÓN DE LAS RELACIONES MATEMÁTICAS ENTRE VARIABLES DEL MODELO (Código Fuente)**

Con negrita e itálica se destacan las variables tal cual pueden encontrarse en el modelo *Brinzal v.1.0.*

#### **IV.3.1- Módulo Suelo y Clima**

En este módulo (figura 7) es posible identificar variables relacionadas con la demanda atmosférica del sitio para cada momento, el contenido de agua y la temperatura del suelo.

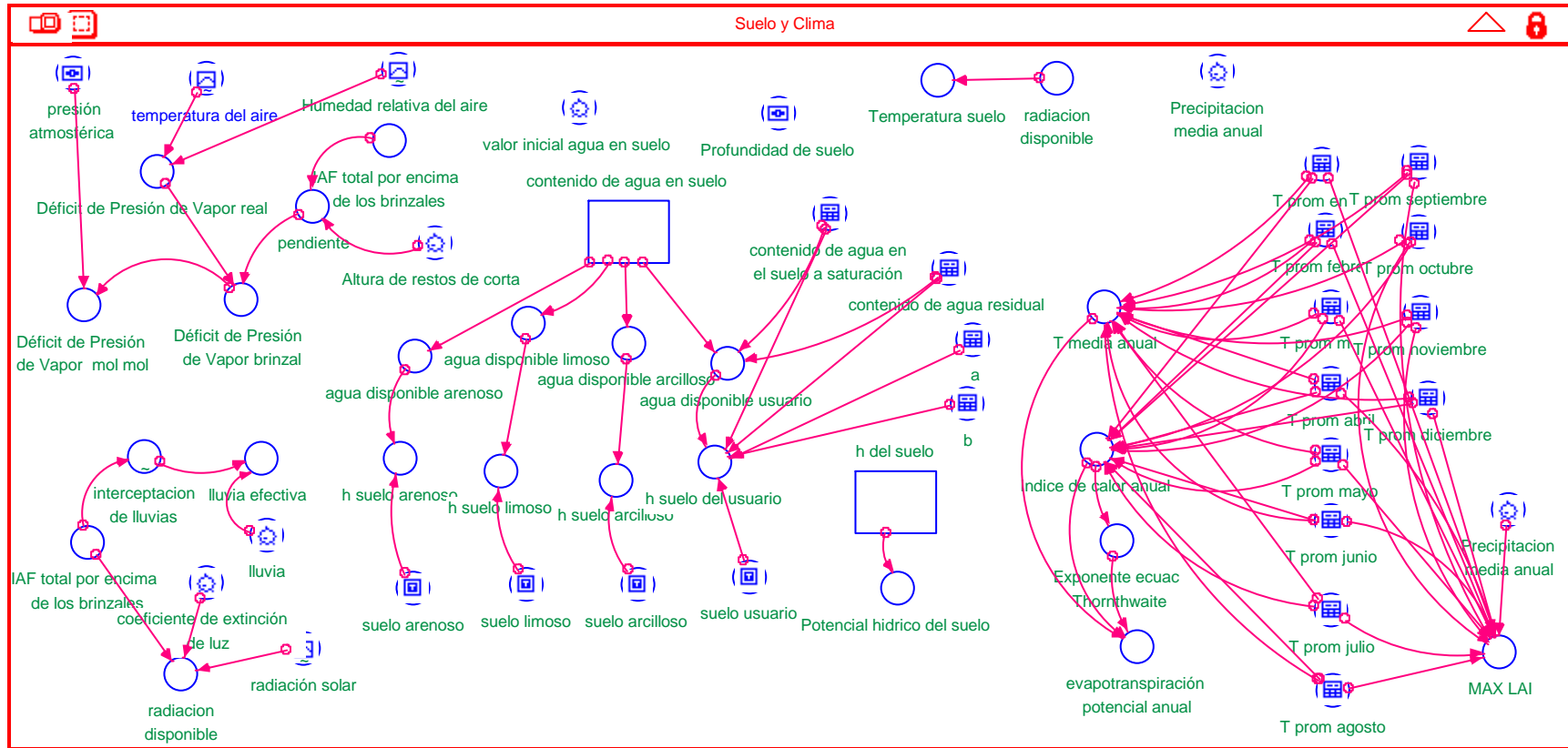


Figura 7: relaciones entre variables correspondientes al módulo Clima y Suelo.

Demanda atmosférica: El modelo brinda tres variables que cambian durante el día:

- **Déficit de Presión de Vapor real** =  $\{6.13753 * e^{(temperatura\ del\ aire * (18.564 - temperatura\ del\ aire / 254.4)) / (temperatura\ del\ aire + 255.57)} - [(Humedad\ relativa\ del\ aire / 100) * 6.13753 * e^{(temperatura\ del\ aire * (18.564 - temperatura\ del\ aire / 254.4)) / (temperatura\ del\ aire + 255.57)}]\} * 0.1$

donde la temperatura del aire y la humedad relativa del aire deben ser introducidas por el usuario (gráfico en la pantalla correspondiente).

- **Déficit de Presión de Vapor brinzal = Déficit de Presión de Vapor real \* pendiente**

en donde

$$pendiente = -0.01 * (IAF\ total\ por\ encima\ de\ los\ brinzales + 0.1 * Altura\ de\ restos\ de\ corta) + 1$$

Esta es una ecuación lógica que pretende simular el efecto de atemperamento de las condiciones climáticas brindado por la presencia del dosel arbóreo y de los restos de corta.

- **Déficit de Presión de Vapor mol mol = Déficit de Presión de Vapor brinzal / presión atmosférica**

donde el valor de la **presión atmosférica** es definido el usuario. Esta conversión es necesaria para obtener unidades apropiadas en el modelo hidráulico.

Además, el modelo estima la evapotranspiración potencial anual del sitio según la ecuación mensual de Thornthwaite (Ver Anexo I) llevada a un valor anual:

- **Evapotranspiración potencial anual** =  $(16 * ((10 * T\ media\ anual / Indice\ de\ calor\ anual)^{Exponente\ ecuac\ Thornthwaite})) * 12$

donde la T media anual se calcula a partir de los valores mensuales ingresados por el usuario y el

$$\text{Indice de calor anual} = \sum(\text{temperatura promedio de cada mes}/5)^{1.5}$$

$$\text{Exponente ecuac Thornthwaite} = 0.492 + 0.0179 * \text{Indice de calor anual} - 0.0000771 * (\text{Indice de calor anual}^2) + 0.000000675 * (\text{Indice de calor anual}^3)$$

La **temperatura del suelo** se estima a partir de la radiación solar disponible, la ecuación que relaciona ambas variables es empírica, estimada a partir de datos de campo tomados por los autores mediante una estación meteorológica automática (ubicada a 40°S, en la Patagonia Argentina). Se obtuvo la siguiente regresión:

- **Temperatura suelo** = 0.0164 \* **radiación disponible** + 10.658

donde

- **Radiación disponible** = **radiación solar** \* e<sup>(-coeficiente de extinción de luz \* IAF total por encima de los brinzales)</sup>

Tanto la radiación solar como el coeficiente de extinción de luz pueden ser modificados por el usuario. El IAF total por encima del brinzal es estimado por el modelo, de acuerdo a la estructura del bosque (ver detalle en el módulo de Bosque y Silvicultura).

La estimación del contenido de agua en el suelo se logra a partir del valor inicial introducido por el usuario y la cantidad de precipitaciones (relojes de **lluvia** y **valor inicial de agua en suelo**) según la siguiente relación lógica:

- **Contenido de agua en suelo** =  
(**lluvia efectiva** / (**Profundidad de suelo** \* 0.1)) + (**valor inicial agua en suelo** - 0.667 \* **IAF de pastos**)  
SI (**Altura brinzal** < 15cm)

- (**lluvia efectiva** / (**Profundidad de suelo** \* 0.1)) + (**valor inicial agua en suelo**)  
SI (**Altura brinzal** > 15cm)

donde

- **lluvia efectiva** = lluvia\*(1- **intercepción de lluvias**)

La interceptación de lluvias depende del IAF total por encima del brinzal (se detalla en el módulo de Bosque y Silvicultura) cuya relación es establecida por el usuario. Como puede observarse, el efecto de competencia ejercido por la presencia de pastos en el sotobosque se introduce disminuyendo el contenido de agua en el suelo efectivo para el brinzal, de acuerdo a lo encontrado por Davis et al. (1998). Este efecto sólo se ejerce si el brinzal es pequeño (arbitrariamente, con una altura menor a 15 cm), por encima de este tamaño, se asume que el brinzal “escapa” al efecto de competencia de los pastos.

El anterior contenido de agua en suelo (%vol) es posteriormente transformado a valores de potencial agua (MPa) para su utilización en el Módulo de Regeneración. Como se mencionó, el usuario puede definir su tipo de suelo. Gracias a la ecuación de van Genuchten, los valores de contenido de agua pueden transformarse en presión de succión (h, cm) siguiendo la ecuación general:

- **h suelo** =  $\frac{\text{contenido de agua en el suelo a saturación} - \text{contenido de agua residual}}{\text{agua disponible usuario} - \text{contenido de agua residual}}^{1/(1-1/b)} - 1)^{1/b} * 1/a$

El cálculo del potencial hídrico del suelo se obtiene a partir de

- **Potencial hídrico del suelo** = -1 \* (0.00009 \* **h del suelo** + 0.003)

Finalmente, como la cantidad máxima de área foliar que puede alcanzar un bosque se relaciona positivamente con el balance hídrico del sitio, se construyó la siguiente variable que responde a la Precipitación media anual y la suma de las temperaturas promedio de los meses con temperaturas promedio mayores a 5°C (Luo et al., 2002):

- **MAX IAF** = 1.70828 + 0.00029906 \* **Precipitación media anual** \*  $\sum(T \text{ prom meses } > 5)$



### IV.3.2. Módulo Bosque y Silvicultura

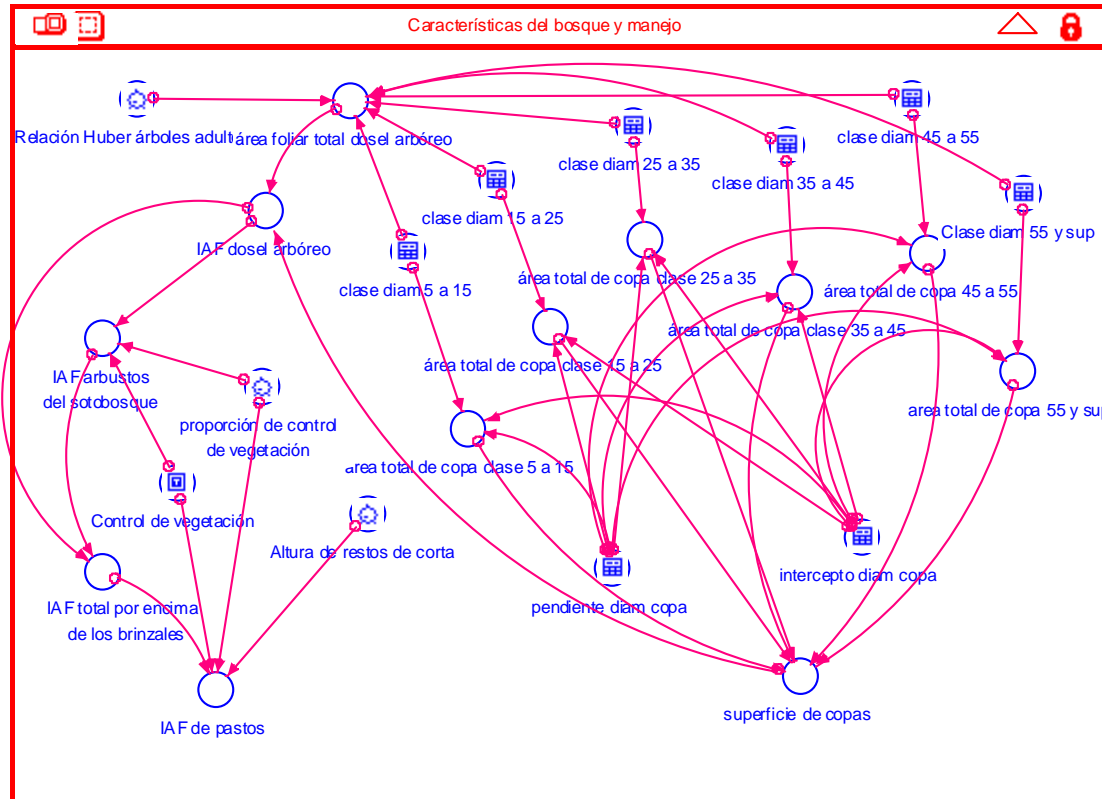


Figura 8: relaciones entre variables del módulo "Características del bosque y su silvicultura".

En la figura 8 se presentan las relaciones generales entre variables. En primera instancia, el modelo estima tanto el área foliar total como la superficie de suelo cubierta por las copas para cada clase diamétrica de la siguiente manera:

- **Área foliar total dosel arbóreo** =  $\pi \cdot 0.0001 \cdot \text{Relación Huber árboles adultos} \cdot \sum (\text{cantidad de individuos de cada clase diamétrica} \cdot (\text{radio de cada clase})^2)$
- **Superficie de copas** =  $\sum (\text{área total de copa de cada clase diamétrica})$  si < 10000  
 = 10000 si => 10000

donde el área total de copa se calcula en base a la información provista por el usuario acerca de la relación existente entre el área de copas y el área basal de los árboles.

El índice de área foliar de los árboles se obtiene como:

- **$IAF \text{ dosel arbóreo} = (\text{área foliar total dosel arbóreo} / \text{superficie de copas}) * (\text{superficie de copas} / 10000)$**

A la vez, por debajo de los árboles se desarrolla el sotobosque que puede eliminarse total o parcialmente haciendo uso del **control de vegetación** y **proporción de control de vegetación**. En este último caso, se retira la proporción del IAF de vegetación del sotobosque que indique el usuario.

En caso de que no exista un control de vegetación, el área foliar de los arbustos y pastos que crecen por debajo de los árboles se calcula como:

- **$IAF \text{ arbustos del sotobosque}$**   
 **$\text{dosel arbóreo} + 2.87)$**   
 **$= (0.25 * IAF \text{ dosel arbóreo}^2 - 1.67 * IAF$**   
**si ( $IAF \text{ dosel arbóreo} < 3$ )**  
 **$= 0$**  si ( **$IAF \text{ dosel arbóreo} > 3$ )**

Los parámetros y forma de esta ecuación fueron deducidos de manera lógica por no encontrarse información al respecto.

Por lo tanto,

$$IAF \text{ total por encima de los brinzales} = MAX IAF \quad \text{si} \Rightarrow MAX IAF$$
$$= IAF \text{ dosel arbóreo} + IAF \text{ arbustos del}$$
$$\text{sotobosque} \quad \text{si} < MAX IAF$$

Existirá pasto sí y sólo sí el **IAF por encima del brinzal** es menor a 5. Posteriormente, la cantidad de IAF de pasto dependerá de la **altura de restos de corta** determinado por el usuario. A la vez, la relación del IAF de pastos con el IAF de los estratos superiores y los restos de cortas dependerá de la relación entre la cantidad de precipitaciones y la evapotranspiración del sitio. Matemáticamente,

**IAF de pastos**

$= 0$  si (**IAF total por encima de los brinzales**>5)

$= -0.408 * \text{IAF total por encima de los brinzales} + 2.08$  si (**IAF total por encima de los brinzales**<5 y (**altura de restos de corta**=0) y (**precipitación media anual/evapotranspiración potencial anual**)>1

$= -0.25 * \text{IAF total por encima de los brinzales}^2 + 0.63 * \text{IAF total por encima de los brinzales} + 1.29$  si (**IAF total por encima de los brinzales**<5 y **altura de restos de corta**=0 y (**precipitación media anual/evapotranspiración potencial anual**)<1

$= (-0.408 * \text{IAF total por encima de los brinzales} + 2.08) * (-0.02 * \text{altura de restos de corta} + 1)$  si (**IAF total por encima de los brinzales**<5 y **altura de restos de corta**>0 y (**precipitación media anual/evapotranspiración potencial anual**) >1

$= (-0.25 * \text{IAF total por encima de los brinzales}^2 + 0.63 * \text{IAF total por encima de los brinzales} + 1.29) * (-0.02 * \text{altura de restos de corta} + 1)$  si (**IAF total por encima de los brinzales**<5 y **altura de restos de corta**>0 y (**precipitación media anual/evapotranspiración potencial anual**) <1

Estas ecuaciones denotan que, en un sitio donde no existe déficit hídrico (precipitación anual es mayor a la evapotraspiración potencial anual), la cantidad (IAF) de pasto disminuye linealmente a medida que aumenta el IAF del dosel

superior, tal como se ha descrito para sabanas húmedas (Hoffman et al, 2005; Simioni et al, 2003). En contraste, cuando el sitio presenta déficits hídricos, se produce un aumento del IAF de los pastos a valores bajos de IAF de árboles (efecto facilitador de los mismos), y luego decrece más lentamente que en el caso de las sabanas húmedas. Esta última ecuación es hipotética y desde el punto de vista teórico se basa en los muchos reportes de efecto facilitador de los árboles sobre el sotobosque en sabanas áridas.

### IV.3.3. Módulo Regeneración

En este módulo (figura 9) pueden identificarse cuatro submodelos relacionados con la fijación de carbono: la fijación propiamente dicha (fotosíntesis), las limitaciones hidráulicas a la misma, la relación de Huber del brinzal y su modificación de acuerdo al ambiente lumínico, y la producción y asignación de biomasa dentro de la planta.

En primer término, el usuario deberá introducir los parámetros fotosintéticos (**Punto de compensación lumínica**, **Rendimiento cuántico** y **Asimilación máxima**) e indicar si la especie es plástica (en este caso, **Plasticidad fisiológica**). En caso de ser una especie plástica, los parámetros **Punto de compensación lumínica** y **Asimilación máxima** cambiarán en relación a la cantidad de radiación fotosintéticamente activa, la cual depende del **IAF total por encima del brinzal**. Como máximo, los parámetros disminuirán hasta un 70% con respecto a su valor original cuando el IAF sea mayor a 6. Por lo tanto,

**Relación parámetro fotos PAR = 0.7** si (**IAF total por encima de los brinzales > 6**)

$$=(-0.05 * \text{IAF total por encima de los brinzales} + 1)$$

si (**IAF total por encima de los brinzales < 6**)

A la vez, la Asimilación máxima real se calcula siguiendo la ecuación:

**$A_{max\ real} = A_{similación\ máxima} * (1 - limitación\ estomática) * (1 - efecto\ de\ fotoinhibición) * (limitación\ térmica\ a\ fotosíntesis)$**

si ( **$Plasticidad\ fisiológica=0$** )

**$= A_{similación\ máxima} * (1 - limitación\ estomática) * (1 - efecto\ de\ fotoinhibición) * (limitación\ térmica\ a\ fotosíntesis) * (Relación\ parámetro\ fotos\ PAR)$**

si ( **$Plasticidad\ fisiológica=1$** )

La ***limitación estomática*** a la fotosíntesis cuantifica cuánto se limita la  $A_{max}$  con el grado de apertura estomática (gs) en cada momento. Esta última depende del estado hídrico del brinzal (ver más adelante). A su vez, la limitación por fotoinhibición y por temperatura dependerán de las relaciones establecidas por el usuario, que cuantifiquen cuánto se afecta la capacidad máxima de fijar C debido a la fotoinhibición, y la curva de óptimo que relaciona la capacidad fotosintética con la temperatura.

Finalmente la fotosíntesis en función de la radiación fotosintéticamente activa se expresa siguiendo la ecuación de Landsberg (1977):

**$fotosíntesis = (A_{max\ real} * Rendimiento\ cuántico * (radiación\ disponible - Punto\ de\ compensación\ lumínico)) / (A_{max\ real} + Rendimiento\ cuántico * (radiación\ disponible - Punto\ de\ compensación\ lumínico))$**

si ( **$Plasticidad\ fisiológica=0$** )

**$= (A_{max\ real} * Rendimiento\ cuántico * (radiación\ disponible - (Punto\ de\ compensación\ lumínico * Relación\ parámetro\ fotos\ PAR))) / (A_{max\ real} + Rendimiento\ cuántico * (radiación\ disponible - (Punto\ de\ compensación\ lumínico * Relación\ parámetro\ fotos\ PAR)))$**

si ( **$Plasticidad\ fisiológica=1$** )

Es importante recalcar que la radiación disponible en cada momento dependerá de la radiación solar y del IAF por encima del brinzal (ver Módulo Suelo y Clima).

En cuanto a las limitaciones hidráulicas, se utilizó el modelo desarrollado por Bond y Kavanagh (1999). En muchas especies, la conductancia estomática (gs) se incrementa desde un mínimo, en respuesta a la cantidad de luz que llegue a la hoja. El valor de conductancia estomática mínima (**gs mínima**) es introducido por el usuario, así como la cantidad mínima de radiación que debe llegar a la hoja para iniciar la apertura estomática (**umbral radiación de apertura estomática**). Del mismo modo, existe una relación entre la apertura estomática y la conductancia hidráulica específica (Ks). Como lo demuestran Cruiziat et al. (2002), existen especies que cierran sus estomas ante un determinado valor umbral de conductividad. Este umbral de conductividad (**Umbral de mínima Ks**) deber ser definido por el usuario. Si el valor de Ks disminuye por debajo de dicho valor umbral, los estomas se cierran tomando el valor de **gs mínima**. Entre la máxima apertura estomática y este punto, la Ks en cada momento disminuye (o no) en función del potencial hídrico de la hoja, de acuerdo a la curva de vulnerabilidad a la cavitación definida por los parámetros **pendiente de la curva de cavitación** y **potencial pérdida 50% Ks**. Por lo tanto,

- **Porcentaje de conductividad hidráulica** =  $1 - \left( \frac{100}{1 + \left( \exp \left( (-1 * \text{pendiente de la curva de cavitación}) * (-1 * \text{Potencial hoja mínimo}) + \text{potencial pérdida 50\% Ks} \right) \right) \right) / 100$

El **potencial hoja mínimo** se calcula siguiendo la siguiente ecuación:

- **potencial hoja mínimo** = **Potencial hídrico del suelo** - (**gs máxima** \* **Déficit de Presión de Vapor mol mol / KI máxima**)

Tanto la **gs máxima** como la **KI máxima** deben ser definidas por el usuario.

De esta manera, la conductancia estomática en un determinado momento dependerá de la conductancia foliar específica, la tensión en el sistema hidráulico (diferencia entre el potencial agua en el suelo y en la hoja) y la demanda atmosférica de la siguiente manera:

**Conductancia estomática real = Conductancia hidráulica foliar específica real\*(Potencial hídrico del suelo-Potencial hoja mínimo)/Déficit de Presión de Vapor mol mol**

La **Conductancia hidráulica foliar específica real** es la **KI máxima** disminuida en cierta proporción por cavitación, en el caso de que la vulnerabilidad a la cavitación de la especie así lo determine.

A la vez, el incremento de la resistencia estomática (disminución de la gs) limita la tasa de asimilación de carbono. Dicha relación debe ser definida por el usuario en el gráfico de **limitación estomática** en el módulo de regeneración.

Como se mencionó, el brinzal fija carbono mediante la fotosíntesis. Sin embargo, parte del carbono se pierde en los procesos de respiración. Así, el balance neto de carbono se calcula como:

- **Fijación neta de carbono = (fotosíntesis \* área foliar)-respiración de mantenimiento**

El área foliar se estima a partir de la relación que establece el usuario con la altura inicial del brinzal (**Altura brinzal**). A partir de la misma variable independiente, siguiendo la relación establecida por el usuario, se estima el valor de la **biomasa inicial** del brinzal.

La **respiración de mantenimiento** se estima siguiendo la ecuación (datos provistos en Hoff et al, 2002):

**respiración de mantenimiento = 14.4\*(Q<sub>10</sub><sup>temperatura del aire/10</sup>)\*(biomasa inicial/1000000)**

El **Q<sub>10</sub>** se refiere al incremento de la tasa de respiración cada 10°C, el cual es específico de la especie y debe ser introducido por el usuario (en general es un valor en torno a 2).

Finalmente, la biomasa final depende de la biomasa inicial y el balance entre la tasa neta de asimilación de carbono o crecimiento y la respiración de crecimiento. Ambas tasas se definen como:

**crecimiento = fijación neta de carbono**

multiplicada por los factores de conversión para llevar las unidades de mmol C s<sup>-1</sup> a grC por cada 15 minutos que es el período de tiempo entre cada corrida de la simulación; y

**respiración de crecimiento = 0**

si crecimiento=<0

$$=0.0069*(Q_{10}^{\text{temperatura\_del\_aire}/10})*(\text{crecimiento}*0.000001)$$

si crecimiento>0

La **Biomasa aérea final** se obtiene multiplicando la **Biomasa final por la Relación parte aérea:subterránea** definida por el usuario.

En el código fuente de programación, las ecuaciones lógicas correspondientes al operador lógico “si” se escriben de la siguiente manera: **IF**(condición a comprobarse)**THEN**(ecuación correspondiente a cuando se comprueba la condición)**ELSE**(ecuación correspondiente a cuando no se comprueba la condición)



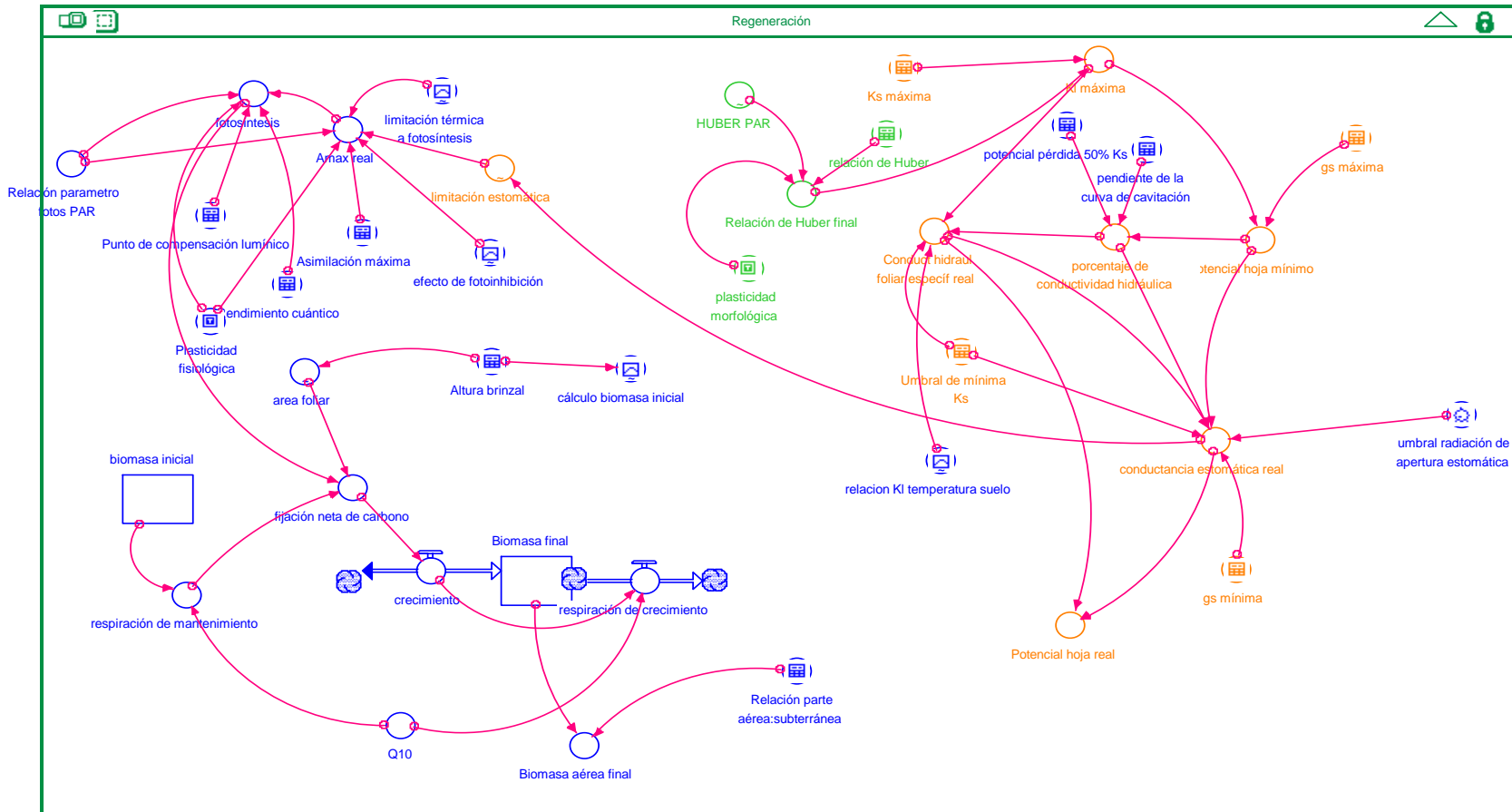


Figura 9: relaciones generales entre variables correspondientes al Módulo de Regeneración.

## V. BIBLIOGRAFIA CITADA:

Bond, B.J. & Kavanagh K.L. 1999. A model of mid-day stomatal closure based on hydraulic conductance. *Tree Physiology* 19:503-510.

Burschel & Huss, 1987. *Grundriss des Waldbaus*. Parey Studentexte. Hamburg, 352.

Cruziat, P., Cochard H. & Améglio T. 2002. Hydraulic architecture of trees: main concepts and results. *Ann. For. Sci.* 59 : 723–752

Davis M.A., Wrage A.J. & Reich P.B. 1998. Competition between tree seedlings and herbaceous vegetation: support for a theory of resource supply and demand. *J of Ecology* 86: 652-661.

GossoneGonzalez & Vazquez. 1947. *Selvicultura*. Libro segundo: estudio cultural de las masas forestales y de los métodos de regeneración. Residencia de profesores, Ciudad Universitaria, Madrid.

Hawley R.C. & Smith D.M. 1982. *Selvicultura práctica*. Ed. Omega. Barcelona.

Hoff C., Rambal S. & Joffre R. 2002. Simulating carbon and water flows and growth in a Mediterranean evergreen *Quercus ilex* coppice using the FOREST-BGC model. *For Ecol Manage* 164: 121–136.

Hoffmann W.A., Rangel da Silva jr E., Machado G.C., Bucci S.J., Scholz F.G., Goldstein G. & Meinzer F.C. 2005. Seasonal leaf dynamics across a tree density gradient in a Brazilian savanna. *Oecologia* 145: 307–316.

Landsberg J. 1977. Some useful equations for biological studies. *Experimental Agriculture* 13: 273-286.

Long S.P., Humphries S. & Falkowski P.G. 1994. Photoinhibition of Photosynthesis in Nature. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 45: 633-662

Luo, T.; Neilson, R.P.; Tian, H.; Vörösmarty, C.J.; Zhu, H. & Liu, S. 2002. A model for seasonality and distribution of leaf area index of forests. *Journal of Vegetation Science* 13: 817-830.

Mayer, H. 1992. *Waldbau auf sozio-oekologischer Grundlage*, 4ª Ed.. Gustav Fischer Vg. Stuttgart.

Schaap, M. 1999. <http://www.ars.usda.gov/Services/docs.htm?docid=8953>

Serrada R., Montero G., Reque J. Eds. (2007). *Compendio de Selvicultura aplicada en España*. INIA – Fundación Conde del Valle de Salazar.

Simioni G., Gignoux J. & Le Roux X. 2003. Tree layer spatial structure can affect savanna production and water budget: results of a 3-D model. *Ecology* 84(7): 1879–1894.

Sociedad Española de Ciencias Forestales (2005 ed.). *Diccionario Forestal*. S.E.C.F., Ediciones Mundi-Prensa.

Sperry J.S., Hacke U.G. & Pittermann J. 2006. Size and function in conifer tracheids and angiosperm vessels. *American Journal of Botany* 93:1490-1500

Spurr S. 1982. *Ecología forestal*. A.G.T. Editor. México.

Tyree M.T. & Sperry J.S. 1989. Vulnerability of xylem to cavitation and embolism. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 40: 19-36

Valladares F., Aranda I. & Sánchez-Gómez D. 2004. Cap. 12: La luz como factor ecológico y evolutivo para las plantas y su interacción con el agua. En: *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Páginas 335-369. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid. ISBN: 84-8014-552-8.

Valladares F., Milagrosa A., Peñuelas J., Ogaya R., Camarero J.J., Corchera L., Sisó S. & Gil-Pelegrín e. 2004. Cap. 6: Estrés hídrico: ecofisiología y escalas de la sequía. En: *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Páginas 163-190. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid. ISBN: 84-8014-552-8.

Valladares, F. & Pearcy R.W. 2002. Drought can be more critical in the shade than in the sun: a field study of carbon gain and photoinhibition in a Californian shrub during a dry El Niño year. *Plant Cell and Environment* 25: 749-759.

van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Am. J.* 44:892-898.

## VI. BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL SUGERIDA

Arturi M.F., Franji J.L. & Goya J.F. (Eds.). 2004. *Ecología y Manejo de los Bosques de Argentina*, Edit. de la Univ. Nac. de La Plata, La Plata, Argentina, edición multimedia.

Boudru M. 1989. *Forest et Sylviculture, traitements des forêts*. Les presses agronomiques de Gembloux. A.S.B.L.. Gembloux.

Cappelli M. 1988. *Selvicoltura generale*, 2ª Ed.. Edagricole. Padova.

Fujimori, T. 2001. *Ecological and silvicultural strategies for sustainable forest management*, Elsevier, Amsterdam.

González Molina, J. 2000. *Apuntes de Selvicultura*. Serv. Publ. Campus de Ponferrada. Univ. León.

Hunter M. (ed.) 1999. *Maintaining biodiversity in forest ecosystems*. Cambridge University Press, pp 335-366.

Jones H. 1992. *Plants and Microclimate. A quantitative approach to environmental plant physiology*. 2<sup>nd</sup> Ed. Cambridge: Cambridge University press.

Kohm A. & Franklin J. (eds.) 1997 *Creating a Forestry for the 21 st. Century*. Island Press, Washington.

Lambers H., Chapin III F.S. & Pons T.L. 1998. *Plant Physiological Ecology*. New York: Springer-Verlag.

Lanier L. 1986. *Precis de Sylviculture*, E.N.G.R.E.F.. Nancy.

Leibundgut H. 1981. *Die natuerliche Waldverjuengung*, Paul Haupt Vg., Bern.

Matthews J.D. 1992. *Silvicultural systems*, 2<sup>a</sup> Ed., Clardon Press. Oxford.

Pugnaire F.I. & Valladares F. (Eds.). 1999. *Handbook of Functional Plant Ecology*, Marcel Dekker, Inc., New York, 920 pp, ISBN 0-8247-1950-6901.

Serrada R. 1996. *Avance apuntes de Selvicultura*. Serv. Publ. E.U.I.T.F.. Univ. Politéc. Madrid.

Smith D., Larson B., Kelty M. & Ashton M. 1996. *The practice of silviculture*. John Wiley and Sons, New York.

Valladares, F. (ed.) 2004. *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid, 587 pp. ISBN: 84-8014-552-8.

Varios autores, número especial de la revista Investigación Agraria: Sist Recur For, 2005, volumen 14(3), con una serie de artículos sobre ecofisiología de especies leñosas, dedicado al Dr. J. Pardos.

## ANEXO I

### AI.1 PARÁMETROS HIDRÁULICOS PARA CLASES TEXTURALES DE SUELO PROMEDIO DETERMINADOS POR EL USDA

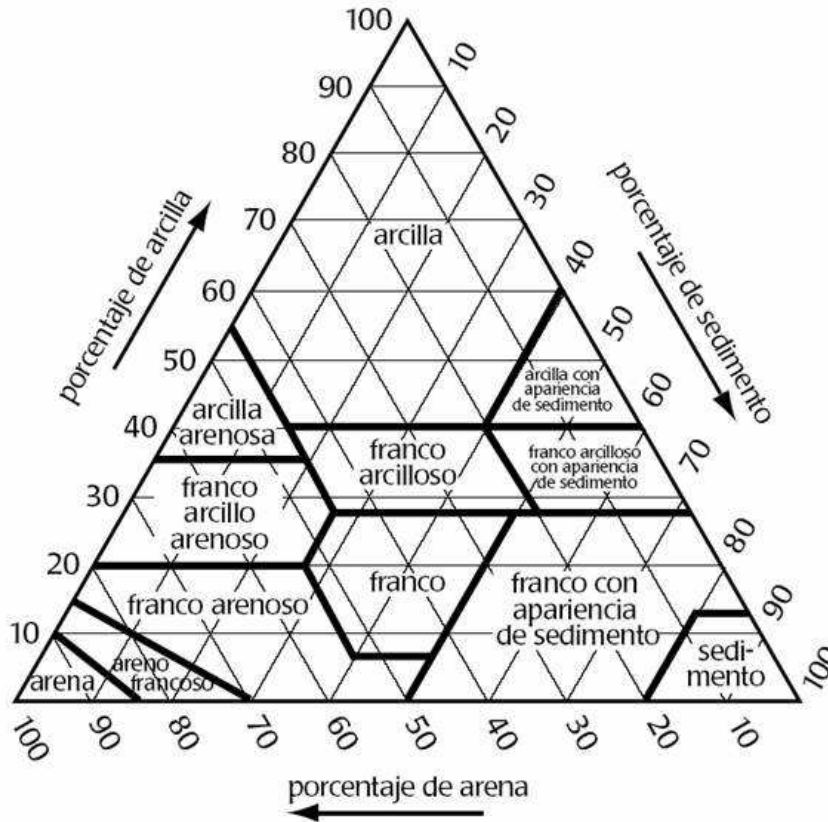
Fuente: US Salinity Laboratory;

<http://www.ars.usda.gov/Services/docs.htm?docid=8953>.

Tabla de clases texturales y sus parámetros hidráulicos

Clase textural	N	-- $\theta_r$ -- cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>		-- $\theta_s$ -- cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>		-- log( $\alpha$ ) -- log(1/cm)		-- log(n) -- log <sub>10</sub>	
Arcilla (Clay)	84	0.098	(0.107)	0.459	(0.079)	-1.825	(0.68)	0.098	(0.07)
Franco Arcilla (C-loam)	140	0.079	(0.076)	0.442	(0.079)	-1.801	(0.69)	0.151	(0.12)
Franco (Loam)	242	0.061	(0.073)	0.399	(0.098)	-1.954	(0.73)	0.168	(0.13)
Franco Arena (L Sand)	201	0.049	(0.042)	0.390	(0.070)	-1.459	(0.47)	0.242	(0.16)
Arena (Sand)	308	0.053	(0.029)	0.375	(0.055)	-1.453	(0.25)	0.502	(0.18)
Areno Arcilla (S Clay)	11	0.117	(0.114)	0.385	(0.046)	-1.476	(0.57)	0.082	(0.06)
Franco Arcilla Arena (S C L)	87	0.063	(0.078)	0.384	(0.061)	-1.676	(0.71)	0.124	(0.12)
Arena Franco (S loam)	476	0.039	(0.054)	0.387	(0.085)	-1.574	(0.56)	0.161	(0.11)
Limo (Silt)	6	0.050	(0.041)	0.489	(0.078)	-2.182	(0.30)	0.225	(0.13)
Limo Arcilla (Si Clay)	28	0.111	(0.119)	0.481	(0.080)	-1.790	(0.64)	0.121	(0.10)
Franco Arcilla Limo (Si C L)	172	0.090	(0.082)	0.482	(0.086)	-2.076	(0.59)	0.182	(0.13)
Franco limo (Si Loam)	330	0.065	(0.073)	0.439	(0.093)	-2.296	(0.57)	0.221	(0.14)

Se puede establecer la clase textural siguiendo el gráfico triangular del sistema de clasificación textural del USDA:



O utilizando la página web:

[http://www.pedosphere.com/resources/bulkdensity/worktable\\_us.cfm](http://www.pedosphere.com/resources/bulkdensity/worktable_us.cfm)

## AI.2 MODELO DE VAN GENUCHTEN (1980) DE RETENCIÓN DE AGUA EN SUELO

El mencionado modelo tiene la siguiente forma matemática:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^{1-1/m}}$$

donde  $\theta(h)$  representa la curva de retención hídrica definida por el contenido de agua,  $\theta$  ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ), como una función de la presión de agua  $h$  (cm), y el contenido de agua residual ( $\theta_r$ ,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) y de saturación ( $\theta_s$ ,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ), mientras que  $\alpha$  ( $1/\text{cm}$ ) y  $n$  son parámetros que indican la forma de la curva.

### AI.3 CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL SEGÚN EL MODELO DE THORNTHWAITE (1948, 1955)

El mencionado modelo permite estimar la evapotranspiración potencial de un sitio según:

$$E_p = 1,6 \left[ \frac{10 * T}{I} \right]^a$$

donde  $E_p$  es la evapotranspiración potencial (mm por mes),  $T$  es la temperatura media mensual ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $I$  es el índice de calor anual  $a$  es un parámetro.

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{T_i}{5} \right)^{1,5} \quad (\text{se calcula a partir de todos los meses del año})$$

$$a = 0,492 + 0,0179 I - 0,0000771 I^2 + 0,000000675 I^3$$