

## **Simulador forestal para *Pseudotsuga menziesii*(Mirb)Franco y *Pinus ponderosa*(Laws) en Patagonia Argentina**

**Ernesto Andenmatten 1, Federico J. Letourneau 1 y Edmundo Getar 2**

1 Campo Forestal Gral. San Martín – EEA Bariloche, INTA

Paraje Las Golondrinas, Chubut. CC 26 (8430) El Bolsón, Río Negro, Argentina

[eadenmatten@bariloche.inta.gov.ar](mailto:eadenmatten@bariloche.inta.gov.ar) ; [fletourneau@bariloche.inta.gov.ar](mailto:fletourneau@bariloche.inta.gov.ar)

2 Universidad Nacional de la Patagonia, San Juan Bosco. Sede Esquel, Chubut, Argentina

### **RESUMEN**

Teniendo como objetivo facilitar la predicción del rendimiento de las forestaciones en Patagonia, se presenta el Simulador Forestal Piltriquitron1.0. Corresponde a la versión inicial con aplicaciones en la estimación del rendimiento de plantaciones de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb)Franco y *Pinus ponderosa* (Laws).

El área de aplicación corresponde con la actual distribución de forestaciones, centro-norte de Chubut, Río Negro y Neuquén, en la región andino patagónica de Argentina.

El simulador integra funciones y algoritmos, que permiten caracterizar las masas de estas especies, tanto a nivel de parcela como de individuos. Las variables predictoras principales son el desarrollo en altura y la proyección de la densidad relativa.

Se encuadra entre los modelos de desagregación del crecimiento, que manteniendo la simpleza de los modelos de rodal, tienen la ventaja de la descripción detallada de las variables que caracterizan a cada árbol individualmente.

La implementación corresponde a una planilla de cálculos, conteniendo hojas con diferentes pasos de operaciones encadenadas. Opera a base de macros, lo cual automatiza las operaciones. Requiere de parte de los usuarios la carga del inventario indicando diámetros y una submuestra de alturas, a partir del cual se inicia el proceso de proyección.

En caso necesario puede introducirse raleo y operar nuevamente el simulador buscando diferentes objetivos. Por otra parte, al estar controlado por índices de densidad, si se superan los máximos propuestos para la región se activa un aviso de atención, brindando la posibilidad de simular la muerte de individuos por competencia intra específica.

En esta versión aún no se incorporan variables de la copa del rodal o de los individuos, por lo que no pueden simularse efectos de intervención de poda.

Palabras claves: Pino Oregón, Pino Ponderosa, predicción forestal, rendimiento forestal, crecimiento forestal, Piltriquitron

## INTRODUCCIÓN

La estimación es un aspecto característico de las ciencias forestales como actividad permanente. Obedece a la necesidad de conocer el rendimiento actual y/o futuro de la producción, en el marco de incertidumbre de quien requiere información para tomar decisiones, cualquiera sea el objetivo a maximizar en un esquema de manejo forestal.

Dado que el patrimonio forestal requiere de plazos prolongados para su formación, y a ello se agrega que en su desarrollo son múltiples las opciones de manejo silvícola, se genera una gran variedad de resultados posibles. Por eso es que la dasometría ocupa un papel preponderante en la formación y actividades de los profesionales del sector.

En este trabajo se presenta la integración de un modelo de simulación, que motivado en las consideraciones anteriores, fue el eje de las actividades del Grupo de Silvicultura de la Estación Experimental Agropecuaria Bariloche, del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Inicialmente fueron trabajos orientados a generar conocimiento sobre la dasometría de plantaciones, y a partir del año 1994 con la formalización de Proyecto Forestal Integrado de INTA se intensificaron los estudios para desarrollar en forma sistemática las funciones y algoritmos necesarios para facilitar el trabajo de estimación forestal. Por una parte constituyen una herramienta para uso profesional, y por otra un inicio parcial en la comprensión del funcionamiento de los complejos sistemas forestales.

Hasta el presente, el modelo está preparado para simulaciones en parcelas de las especies Pino Oregón (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco) y Pino Ponderosa (*Pinus ponderosa* (Laws)), cultivados en las provincias de Chubut, Río Negro y Neuquén, en el norte de la región andino patagónica de Argentina.

## BREVE DESCRIPCION DEL SIMULADOR

### Tipo de modelo

Vanclay (1994) presenta una clara caracterización y descripción de los modelos forestales, que los divide en dos grandes grupos. Modelos de rodal (agregados) y modelos de árbol individual. En una situación intermedia se ubica un tercer grupo, denominado modelos de desagregación, que presentan las ventajas de simpleza y robustez de los modelos de rodal (agregados), y parte de la precisa descripción lograda con los modelos de árbol individual.

Piltriqutron sigue la propuesta de desagregación (ver Zhang *et al.*, 1993), donde sintéticamente los pasos de operación son los siguientes:

- Inventario de los individuos de la parcela (especie; diámetros; edad; estado sanitario y forma; sub-muestra de alturas).

- A partir de esos datos, se calcula o estima para cada individuo el resto de variables descriptivas (área basal; altura individual; volumen individual).
- Con esos datos individuales se calculan o estiman los parámetros que caracterizan a la parcela en forma agregada, extrapolados a hectárea: número de individuos; área basal; diámetro cuadrático medio; altura dominante; índice de sitio; volumen.
- Para esta propuesta de proyección, se estiman los valores de los índices de densidad que forman el núcleo de proyección: densidad relativa y factor de altura.
- Se proyectan los parámetros a un tiempo futuro, obteniendo como resultado los nuevos valores que caracterizan el rodal en forma agregada.
- Por medio del algoritmo de desagregación desarrollado, se estima el tamaño final de cada individuo componente de la parcela, aplicando el concepto que la suma total de las variables individuales debe satisfacer el valor total de esa variable para la parcela en conjunto. Es decir se impone una conciliación donde la variable proyectada en forma agregada es el valor que se toma como referencia. De esta manera se mantienen la robustez reconocida en los modelos agregados y la caracterización de cada planta de los modelos individuales.

### **Fundamentos del Sistema de Proyección**

La base es el modelo de rendimiento que emplea la altura dominante y densidad relativa como variables predictoras (Ecuación 1) (Mitchell y Cameron, 1985):

$$V = a * H^b * DR^c \quad (1)$$

Donde:

V: volumen de la parcela (m<sup>3</sup>/ha);

H: altura dominante, promedio de las alturas estimadas de las 100 plantas más gruesas por hectárea (m);

DR: densidad relativa (Curtis, 1982)

a; b y c: parámetros de la función.

$$DR = \frac{G}{Dg^{0.5}} \quad (2)$$

Donde:

G: área basal (m<sup>2</sup>/ha);

Dg: diámetro cuadrático medio (cm).

La Ecuación 1 tiene una interpretación muy simple e intuitiva, ya que la variable rendimiento (V), es función del tamaño que alcanzan la altura dominante del rodal (H) y del valor del índice de densidad relativa (DR). Por lo tanto, si se logra proyectar

adecuadamente las variables predictoras, se puede estimar el rendimiento en etapas futuras de la parcela.

La proyección de la altura dominante sigue la propuesta clásica (Prodan, 1997), empleando curvas de crecimiento en altura basada en un modelo que tiene como variables el índice de sitio y la edad.

La proyección de la densidad relativa se basa en las relaciones tamaño-densidad, que expresan interacciones de competencia intraespecífica. Existen numerosos trabajos al respecto, y sobre ellos el grupo de Silvicultura desarrolló una propuesta metodológica que permite la integración de dos índices de densidad, el índice de densidad relativa y el factor de altura (Andenmatten *et al.*, 1997; Andenmatten, 1999). Ambas expresiones tratan la relación tamaño-densidad empleando el mismo concepto, pero basadas en diferentes elementos de la masa forestal. El índice de densidad relativa (Ecuación 2) utiliza el área basal y el diámetro cuadrático medio, ambos muy relacionados al volumen en pie, lo cual lo torna un índice que aporta precisión en las estimaciones. Ambos parámetros del rodal utilizan el total de individuos que componen la masa viva de la parcela. El factor de altura (Ecuación 3) emplea la altura dominante de la parcela y el distanciamiento promedio, con la ventaja de ser relativamente simple de modelar, aunque menos preciso al momento de expresar el rendimiento. Mientras para la altura dominante se utiliza el promedio de alturas de los 100 individuos más gruesos por hectárea (Assman, 1970), para el distanciamiento medio se utiliza el total de individuos vivos de la parcela.

$$FH = \frac{H}{d} \quad (3)$$

Donde:

FH: factor de altura (m/m);

H: altura dominante del rodal (m);

d: distanciamiento medio (m).

De esta manera se siguen los planteamientos de García (1994), donde el tamaño más que la edad es la variable directriz de la proyección. Este planteamiento facilita el posterior abordaje bajo el concepto de la teoría de “estados y transiciones”, que el mismo autor recomienda como base de modelos forestales.

Para ello deben definirse las variables que describen el estado y las funciones de transición que los relacionan, y citando textualmente a García (op. cit.), “la idea es caracterizar el estado del sistema en cualquier instante del tiempo de modo que dado el estado actual el futuro no dependa del pasado”, y continúa “a grandes rasgos, un estado de un sistema en un instante dado es la información necesaria para determinar el comportamiento del sistema desde ese instante en adelante”. Sintetizando, no importa como se llega a un estado dado, no importa su historia, sino el estado en si mismo.

El conjunto logrado debe cumplir con los siguientes requerimientos (Chauchard, 2001): “consistencia”, si el tiempo transcurrido es nulo, el estado final es idéntico al estado inicial; “composición”, el resultado de proyectar el estado inicial desde t0 a t1 y luego desde t1 hacia t2 debe ser el mismo que si proyectara de una vez desde t0 a

t2; y “causalidad”, un cambio del estado solo puede ser causado por actuaciones ocurridas dentro del intervalo de tiempo de proyección y no por eventos en otros períodos.

Al proyectar la densidad relativa, y mantener constante el número de individuos durante el período de proyección (condición de causalidad), se puede calcular el valor de área basal al fin del período. Para esto se aplican relaciones que surgen de las ecuaciones que definen el valor de la densidad relativa.

A nivel de los individuos, el sistema no aplica la proyección de una función de distribución como podría ser la conocida función de Weibull (del Río G., 2001), sino que opera directamente sobre la lista inicial de diámetros. Mantiene así el tamaño de cada planta al inicio de cada período de proyección. El algoritmo para proyectar a los individuos (ver Andenmatten, 1999) introduce el cambio de altura de los mismos, estimada mediante la aplicación del concepto de índice de sitio individual, y un procedimiento de actualización de los diámetros, controlado para que la suma de áreas basales individuales se concilie con la proyección agregada del área basal del rodal. De esta manera se mantiene la caracterización de cada planta en altura y diámetro.

En base a estas variables se estima el volumen individual, y puede estimarse el volumen contenido hasta cierto diámetro de utilización preestablecido. Por otra parte, mediante la sumatoria de los volúmenes individuales se estima el volumen de la parcela.

Esta forma de proyectar la lista de diámetros y estimar las alturas individuales, tiene la ventaja que permite introducir simulaciones de raleo o mortalidad, eliminando manualmente los individuos seleccionados para ese fin. Al hacerlo se recalcula la nueva situación de la parcela (su nuevo estado) y se reinicia la proyección.

## **Funciones que integran el simulador**

Todas las funciones que integran el modelo, como así también los algoritmos están disponibles en forma conjunta en las Comunicaciones Técnicas del Grupo de Silvicultura de la EEA Bariloche-INTA (incorporadas en el CD que contiene el Simulador). Los límites de aplicación están descriptos en cada desarrollo en particular según la muestra disponible.

Dado que un objetivo de implementar esta primer versión en planilla de cálculos es de divulgación, todas las funciones empleadas y sus coeficientes pueden encontrarse en las celdas correspondientes según lo que se este calculando o estimando en cada caso. También pueden buscarse las relaciones con la aplicación de la planilla de cálculos “ratrear precedentes” (en la barra de menú: Herramientas/Auditoría de fórmulas/retrear precedentes (o la contraria, ratrear antecedentes)). Por otra parte dentro de muchas celdas se han incorporado “comentarios” que se hacen visibles al posicionar el cursor sobre la misma.

## Implementación del simulador

La implementación del simulador se realizó en planillas de cálculo, con macros que operan las funciones y procedimientos. La organización en “hojas” de la planilla de cálculo sigue una secuencia de procesamientos tal como podría realizar un profesional en forma manual.

A continuación se describen brevemente las hojas del modelo:

### Caracterización Inicial

- **Inventario**, donde se introducen los datos de la parcela.  
Una vez completados los datos requeridos en esta hoja, debe activarse el macro Procetodo (Ctrl + p) que inicia automáticamente el proceso completo de cálculos hasta completar la última hoja de la planilla (Salidas). La opción es activar el macro desde la barra de menú de la planilla de cálculos (Herramientas/Macro/Proce todo).
- **Relación altura-DAP**, donde se estiman los parámetros de la función correspondiente.
- 
- **Procesamiento parcela**, donde para cada individuo se estiman o calculan: altura, área basimétrica, clase y categoría diamétrica según su diámetro, y el volumen individual. Sobre esa información se estiman los parámetros de la parcela y se extrapolan a valores por hectárea: número de individuos, área basal y volumen. Se estima el valor de altura dominante, como promedio de las alturas estimadas de las 100 plantas más gruesas por hectárea. Con ese valor y la edad a la altura del pecho estima el valor de índice de sitio (IS20) con edad de referencia 20 años a la altura del pecho.
- 
- **Resumen estado inicial**, donde se genera una tabla con los parámetros descriptivos de la situación inicial de la parcela, con sus valores extrapolados a hectárea.

### Proyección

- **Proyección diámetros ajustada**, donde se realizan las sucesivas proyecciones de la parcela. A partir de la situación inicial, y de acuerdo al período de proyección seleccionado, se repite 18 veces la proyección. En cada ocasión se repite la tabla de rodal, para permitir la simulación de raleos. La primera es la situación de la parcela en su estado inicial o posteriormente luego de la proyección. La segunda, es la situación de la parcela luego de una intervención de raleo, y partir de la cual se realiza la siguiente proyección. Brevemente, significa que en un momento dado se tiene la descripción de la parcela, e inmediatamente se ralea (considera que no hay paso de tiempo). En términos de la teoría de estados y transiciones, cuando no hay paso del tiempo no puede haber cambio de estado. Por lo tanto, la situación luego del raleo no es un estado posterior a una proyección, sino el resultado de una acción modificadora que genera un estado independiente de la proyección. Una vez definido este nuevo estado se puede reiniciar la proyección mediante el algoritmo propuesto.

- 
- **Distribución**, donde se procesa la información de la parcela estableciendo las frecuencias de cada clase diamétrica.
- 
- **Volumen**, donde se calcula el volumen aprovechable según un diámetro de utilización indicado.
- 
- **Altura**, donde se generan los pares de diámetro y altura de los individuos para cada período de proyección. Se emplea en la generación de un gráfico que permite visualizar la evolución de la relación altura – diámetro con el tiempo.
- 
- **Salidas**, donde se resumen los datos que caracterizan la parcela en cada período. Indican para cada período la situación de la parcela en su estado pre-raleo y post-raleo. Obviamente ambos coincidirán en todo cuando no se aplique raleo. Esta hoja introduce filas con cálculos económicos simples, que permiten estimar los resultados económicos descontados al año de inicio de las proyecciones. Cada vez que se corre el modelo, la hoja **Salidas** se guarda automáticamente, para permitir la comparación de distintas proyecciones.

### **Simulación de Raleos o Introducción de Mortalidad Asociada a Competencia Intraespecífica**

- **Para simular raleos**, luego de observar la información de la hoja Salidas, hay que retornar a la hoja **Proyección diámetros ajustada** y se procede a “desproteger” la hoja.

Se ubica el año o período donde se quiere simular el raleo, y en la segunda repetición del estado se procede a eliminar los individuos que se quieren quitar (en la hoja ubicar las columnas con encabezado celeste). Debe tomarse la precaución de eliminar a partir de esta columna hasta el final de la fila. Una vez eliminados los individuos del raleo, se activa el macro Postraleo (ctrl. + r) y se obtiene una nueva hoja Salidas (Herramientas/Macros/Postraleo).

- **Para simular mortalidad por competencia intraespecífica**, se procede en forma similar. Sin embargo, aquí la decisión de introducir mortalidad (eliminar individuos por autoraleo), se basa en la observación de los valores que toman los índices de densidad en cada período de proyección.

Una vez eliminados los individuos del auto-raleo, se activa el macro Postraleo (ctrl. + r) y se obtiene una nueva hoja Salidas. A efectos de apoyar la decisión de introducir mortalidad asociada a competencia intraespecífica, se incorporó una llamada de ATENCION, que se activa cuando se han superado los valores máximos de densidad relativa o factor de altura. Es la aplicación del concepto

desarrollado por Hart-Becking (citado por Prodan *et al.*, 1997), y por Reineke (1933), en el desarrollo de la dependencia tamaño-densidad.

-

- La idea de no limitar el modelo a esos valores máximos, es porque se considera que las determinaciones de los mismos pueden modificarse a medida que se genere nueva evidencia. De esta manera se deja en opinión del profesional el valor máximo de referencia que utilizará, ya sea respetando el valor máximo propuesto, u otro que considere conveniente según información particular que fuera de su conocimiento. Por ejemplo en nuestra base de datos tenemos de parcelas que superan los máximos propuestos. Esto es propio de cualquier distribución muestral ya que el criterio para establecer el máximo fue estimar el promedio de valores de ambos índices, y sumarle dos veces el desvío estándar. Con esto dejamos de manifiesto que pueden existir en la población valores que estén ubicados más allá de dos desvíos estándar y que seguirían perteneciendo a la población, y a la conformación de la muestra con su sesgo propio.

## **PRESENTACION DEL SIMULADOR**

Se entrega un CD con el Simulador Piltriquitron v1.0, que tiene cargados los datos de una parcela de muestra. Consiste en los datos de una parcela inventariada y procesada en forma completa. Esto debería facilitar la familiarización del futuro usuario analizando un caso ya desarrollado.

A partir de ese punto, el usuario debería poder vaciar el Simulador, ingresar sus propios datos de inventario y realizar la proyección de su parcela.

Recomendamos leer las breves instrucciones incluidas en la primer hoja de la planilla de cálculos, e interiorizarse de los componentes y acciones válidas antes de intentar un uso completo del mismo.

El tamaño de la planilla es aproximadamente de 1,8 Mb (comprimido aproximadamente 0,7 Mb), que obviamente se reduce al limpiar los datos y procesamiento de la parcela de muestra.

Si bien nuestra intención fue generar un Simulador “amigable” para con el usuario, es innegable que quienes no estén familiarizados con la base teórica del mismo puedan sentir una primer sensación de frustración en sus primeros intentos de hacerlo correr. Es importante por lo tanto recibir un apoyo mínimo para superar los primeros intentos de uso.



## **CONSIDERACIONES FINALES**

Esta primer versión de Piltriquitrón podrá considerarse realmente validada solo mediante el uso y manifestaciones de los colegas en su tarea profesional. De nada valdría presentar un gran número de pruebas si no logramos la aceptación de los mismos por los usuarios.

La validación no será simple, ya que en general escasean las parcelas permanentes de medición repetida, y más aún, que tengan suficientes réplicas para lograr una inferencia estadística aceptable. No obstante, en las sucesivas publicaciones de cada desarrollo que forman la base del modelo, se realizaron las validaciones correspondientes que pueden consultarse particularmente.

Por el momento no se incluye la copa de las plantas como elemento descriptivo del estado, ni en las funciones de transición para realizar la proyección, por lo que no se incorporan diferencias en la misma debida a la historia de la parcela, ni resultado de podas. Es un elemento a incorporar en futuros avances del simulador, ya que evidentemente es un componente clave del crecimiento que debe incorporarse a la descripción del estado y en las funciones de transición para mejorar las salidas del simulador.

Por último, es importante ahondar en la vinculación de distintas disciplinas del área forestal, que permitan ir integrando y ampliando el conocimiento de los procesos que gobiernan a las variables que hoy incluimos como predictoras, pero que en sí no son la causa sino solo son el efecto o resultado de las complejas interacciones que subyacen.

## **AGRADECIMIENTOS**

En el financiamiento de los trabajos que dieron lugar al presente simulador participaron en distintos momentos: ex Instituto Forestal Nacional; Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco; Ciencia y Técnica de la provincia de Chubut; Proyecto Forestal de Desarrollo de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación; Asociación Cooperadora de la EEA Bariloche-INTA; Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, mediante el Proyecto Forestal Integrado y el Proyecto de ámbito nacional 571.

Sin especificar nombres para evitar olvidar involuntariamente a nadie, agradecemos a un gran número de personas que nos apoyaron de una u otra forma a lo largo de estos años. Y como siempre mencionamos, agradecemos especialmente a los anónimos de siempre que confiaron en el desarrollo de un sector forestal serio, ya sea desde el sector productivo, ya sea desde el sector estatal, y lograron la implantación de tantos rodales que hoy nos permiten a nosotros la presentación de este modelo.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Andenmatten, E. 1999. "Proyección de Tablas de Rodal para Pino Oregón en la región Andino-Patagónica, de las Provincias de Chubut y Río Negro, Argentina". Tesis Maestría. Universidad Austral de Chile. Valdivia. 63 p.

Andenmatten E.; F.J. Letourneau; A. ORTEGA. 1997. "Vínculo entre Densidad Relativa y Factor de Espaciamiento y su relación con la Altura Dominante". Actas IUFRO Conference "Modelling Growth of Fast-Grown Tree Species. Alicia Ortega y Salvador Gezan editores. Valdivia. Chile. 265-276. (Reeditado por INTA, EEA Bariloche, Área Forestal, Silvicultura. Comunicación Técnica N° 07).

Assmann, E. 1970. "The principles of Forest Yield Study". Pergamon Press. Oxford. 506 p.

Curtis, R.O. 1982. " A Simple Index of Stand Density for Douglas-fir". For. Sc. Vol 27 (1): 92-94.

Garcia, O. 1994. "El enfoque del espacio de estados y transiciones en modelos de crecimiento" ("The State- Space approach in growth modelling". Can. Jr. For. Res. 24:1894-1903). Traducción de O. García.

Chauchard, L. 2001. "Crecimiento y producción de repoblaciones de Pinus radiata D.Don en el territorio histórico de Guipúzcoa (País Vasco)". Tesis doctoral 40. Universidad Politécnica de Madrid. 173 p.

Mitchell, K.J.; I.R. Cameron. 1985. "Managed Stand Yield Tables for Coastal Douglas-Fir: Initial Density and Precommercial Thinning". Land Management Report Number 31. B.C. Ministry of Forests Research Branch. 69 p.

Prodan, M.; R. Peters; F. Cox; P. Real. 1997. "Mensura forestal". Ed. IICA, 586 p.

Vanclay, J.K. 1994. "Modelling Forest Growth and Yield: Applications to Mixed Tropical Forests". CAB International. 310 p.

Zhang, L.; J.A. Moore; J.D. Newberry. 1993: "Disaggregating Stand Volume Growth to Individual Trees". For. Sc. 38 (2): 295-308.