

Modelización del secado de madera de *Pinus pseudostrobus* utilizando el método de la curva característica

Emilio HERNÁNDEZ BAUTISTA¹
Sadoth SANDOVAL TORRES¹
Juan RODRÍGUEZ RAMÍREZ¹
Omar Alí VELASCO CRUZ²

¹ Centro interdisciplinario de investigación para el desarrollo integral regional unidad Oaxaca.
CIIDIR Oaxaca
IPN Hornos No. 1003, Col. Noche Buena
Santa Cruz Xoxocotlán
Oaxaca
México

² Instituto tecnológico de Oaxaca
Av. Ing. Víctor Bravo Ahuja No. 125
esq. Calz. Tecnológico
Oaxaca de Juárez
Oaxaca
México



Figura 1.
Túnel de secado.

RÉSUMÉ

MODÉLISATION DU SÉCHAGE DU BOIS DE *PINUS PSEUDOSTROBUS* SELON LA MÉTHODE DE LA COURBE CARACTÉRISTIQUE

Actuellement il existe une augmentation de la demande en produits forestiers au niveau mondial. Le séchage est une étape importante à l'intérieur du processus de transformation du bois, une opération qui bonifie sa qualité et accroît sa valeur. L'article présente l'analyse des expérimentations de séchage du bois *Pinus pseudostrobus* par convection d'air chaud, avec l'objectif de modéliser les cinétiques de séchage en utilisant la méthode de la courbe caractéristique de séchage. Les expérimentations ont été menées sous différentes conditions de température, obtenant ainsi un modèle pour la simulation de l'évolution du niveau d'humidité dans le matériau en fonction du temps. Le modèle part de l'analyse de la vitesse réduite et de l'identification de phases dans le séchage. Les paramètres du modèle ont été évalués en utilisant la méthode de réduction de la somme des erreurs quadratiques, calculées en comparant les cinétiques expérimentales avec les simulées.

Mots-clés : *Pinus pseudostrobus*, séchage, courbe caractéristique de séchage, modélisation.

ABSTRACT

MODELLING THE DRYING PROCESS FOR *PINUS PSEUDOSTROBUS* BY MEANS OF THE CHARACTERISTIC CURVE METHOD

Worldwide demand for forest products is currently on the increase. Drying is an important stage in timber processing, enhancing timber quality and increasing its value. This article describes an analysis of timber drying trials conducted for *Pinus pseudostrobus* using hot air convection, the aim being to model the kinetics of the drying process by means of the characteristic drying curve method. The trials were conducted under different temperature conditions to build up a model capable of simulating changes in moisture levels in the wood material over time. The model was built up from an analysis of slow drying and by identifying the different stages in the drying process. The model settings were assessed by the minimised mean square error method, calculated by comparing the experimental kinetics with those simulated kinetics.

Keywords: *Pinus pseudostrobus*, drying, characteristic drying curve, modelling.

RESUMEN

MODELIZACIÓN DEL SECADO DE MADERA DE *PINUS PSEUDOSTROBUS* UTILIZANDO EL MÉTODO DE LA CURVA CARACTERÍSTICA

Actualmente existe un incremento en la demanda de productos forestales a nivel mundial. El secado es una etapa importante dentro del proceso de transformación de la madera, esta operación mejora su calidad e incrementa su valor. En el presente trabajo se analizan experimentos de secado de madera *Pinus pseudostrobus* por convección de aire caliente, con el objetivo de modelar las cinéticas de secado utilizando el método de la curva característica de secado. Los experimentos se llevaron a cabo a diferentes condiciones de temperatura, obteniendo un modelo para la simulación de la evolución del contenido de humedad en el material respecto al tiempo. El modelo parte del análisis de la velocidad reducida y la identificación de fases de secado. Los parámetros del modelo se estimaron utilizando el método de reducción de la suma de errores cuadráticos, calculados de la comparación de las cinéticas experimentales y las simuladas.

Palabras clave: *Pinus pseudostrobus*, secado, curva característica de secado, modelización.

Introducción

Durante el proceso de secado de madera el contenido de humedad puede existir en distintos estados, como agua libre que se presenta en las cavidades celulares, agua ligada higroscópicamente adherida a las paredes celulares, vapor de agua en las cavidades celulares o lúmenes y agua constitutiva en composición química con las paredes de las células (COUMANS, 2000). Solo el agua libre, ligada y vapor de agua pueden eliminarse mediante el secado. La pérdida de peso de la muestra en el proceso se puede representar como una cinética de secado, que muestra la evolución del contenido de humedad, o también como la velocidad de secado respecto al tiempo o al contenido de humedad de la madera (SKAAR, 1988).

Al principio del secado se elimina el agua libre que se encuentra en los capilares, interconectados lateral y axialmente, el efecto es más pronunciado a medida que el radio capilar es de menor magnitud, este movimiento se debe a diferencias de presión y depende del tamaño de los capilares. El flujo capilar originado por estas fuerzas hace que el agua interior se mueva de una célula a otra buscando la superficie de las piezas de madera (PERRE, TURNER, 2006). Mientras el proceso de secado avanza, el agua libre de las cavidades celulares se elimina. La humedad permanece en la madera en forma de vapor en las cavidades celulares y en forma de agua higroscópica en los espacios intermicelares de las paredes celulares (TURNER, 1996).

La acción capilar se desplaza progresivamente hacia el centro de la madera para desaparecer gradualmente cuando el contenido de humedad tiende al punto de saturación de la fibra (AHMADI *et al.*, 1998). Cuando cesa la acción capilar, las cavidades celulares solo contienen aire y vapor de agua, generándose una presión de vapor que será más grande cuanto mayor sea el contenido de vapor en dichas cavidades, y cuanto mayor sea la temperatura de la fase gaseosa (SKAAR, 1988).

El método de la curva característica de secado (CCS) modela la cinética de secado partiendo de datos experimentales y de la identificación de diferentes fases en la velocidad de secado, considerando una rapidez de secado de referencia y estableciendo la hipótesis de que los mecanismos de transporte de humedad dependen principalmente del potencial de humedad reducido (JANNOT *et al.*, 2004). De lo anterior se tiene la presencia de dos zonas, una superficial en el dominio higroscópico, donde la migración de humedad está regida por la difusión de vapor de agua simultáneamente con difusión de agua líquida, y una zona interior donde el agua libre migra por capilaridad (NI *et al.*, 1999).

Si bien la utilización del modelo planteado requiere el cálculo de parámetros, para determinar cada uno de estos valores resulta conveniente adoptar un sistema de análisis lo más sencillo posible y que permita optimizar los ensayos realizados. Los parámetros del modelo propuesto se estimaron reduciendo la diferencia cuadrática entre las curvas experimentales y las teóricas.

El objetivo de este trabajo ha sido modelar la cinética del secado, por convección de aire caliente, de madera de *Pinus pseudostrobus* utilizando el método de la curva característica de secado.



Figura 2.
Muestras de madera en el túnel de secado.

Metodología

Selección y preparación de muestra

Con el objetivo de determinar el contenido de humedad y llevar a cabo cinéticas de secado de madera de la especie *Pinus pseudostrobus* a diferentes condiciones de temperatura y humedad relativa, se seleccionaron 6 tablas de madera al azar sin secar, en estado fresco, del almacén del Aserradero “Pueblos Mancomunados de la sierra Norte”, que se ubica en la comunidad de Macuilxóchitl de Artigas Carranza situada en el Municipio de San Jerónimo Tlacoahuaya, Oaxaca, México. Dicha madera fue clasificada como madera de contingencia por presentar manchas de color azul.

Para determinar el contenido de humedad promedio de la madera, se cortaron 28 probetas de las siguientes dimensiones, 15 centímetros (cm) de largo, 5 cm de ancho con un espesor de 2,54 cm, además se cortaron también 23 tablas de 25 cm de largo, 15 cm de ancho con el mismo espesor que las anteriores, con el fin de utilizarlas en los experimentos de secado. Estas dimensiones están definidas por el tamaño del soporte del túnel de secado, ya que es el tamaño máximo de muestra que se puede instalar en el equipo.

Las tablas frescas de madera fueron rociadas con agua en spray y cubiertas con plástico impermeable para su traslado al laboratorio en donde fueron almacenadas a 0 °C en el refrigerador, para evitar su degradación.

Determinación del contenido de humedad

Se determinó el contenido de humedad utilizando el método gravimétrico regido por la norma DIN-52183 (DIN, 1992), que consiste en introducir las muestras en un horno a 105 ± 2 °C aproximadamente por 30 horas o hasta obtener un peso constante que consistió en 2 pesos consecutivos iguales cada 3 horas, cuya variación fue de centésimas de gramos, y se calculó el contenido de humedad (CH) de las 28 probetas de madera. Se utilizó una balanza analítica con rango de 0-4.200 g y una precisión de 0,01 g.

Tabla I.
Condiciones de los experimentos de secado de madera.

Experimento	Temperatura (°C)	HR* (%)	Velocidad del aire (m/s)
1	50	12	2,7
2	60	5	2,7
3	70	2	2,7
4	80	1,5	2,7
5	80	1,5	2,7
6	60	6	2,7
7	70	2	2,7
8	50	12	2,7

* HR: humedad relativa (%).

Experimentos de secado

El túnel de secado utilizado en las cinéticas está diseñado para que se logre un flujo de aire con velocidad y temperatura, uniforme y controlada (figura 1). El aire se calienta mediante dos resistencias eléctricas de 20 Ω (2,4 Kw) manteniéndose a una temperatura constante controlada por medio de un control PID. La medición de la temperatura se da a través de termopares tipo J, conectados simultáneamente y aislados eléctricamente para reducir el error del sistema, estos termopares se encuentran dentro de una jaula (soporte) en la cual se coloca la muestra, con la finalidad de medir la temperatura interior y exterior del material.

La velocidad del aire se regula con un variador de frecuencia conectado al motor del ventilador centrífugo, el flujo del aire producido en el conducto en cada frecuencia

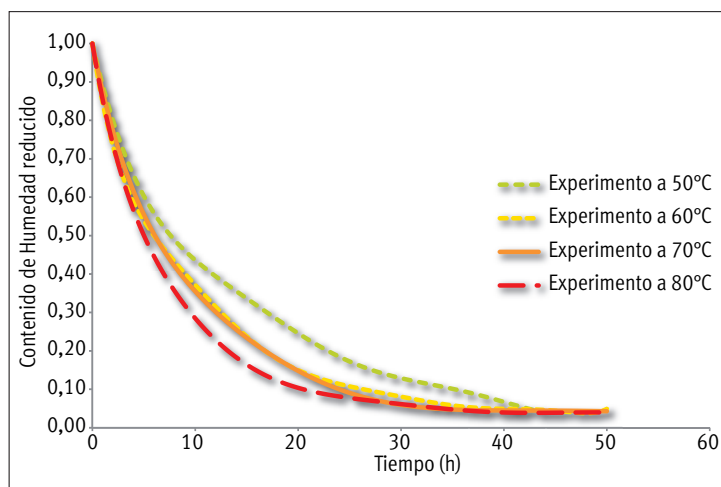


Figura 3.
Gráfica de contenido de humedad reducido en función del tiempo a diferentes temperaturas.

del motor del ventilador se mide con un anemómetro (A.B.B Drives 0,3-25 m/s \pm 0,05 m/s) para obtener la velocidad de aire requerida en el secado de madera.

El peso de la muestra durante el proceso es registrado por el sistema de adquisición de datos conectado a una celda de carga (con un rango de 0-11,34 kg y una precisión de 0,1 %) que mide la tensión que se produce por el peso de la muestra.

El túnel cuenta con un controlador automático programable, National Instrument de la serie FP-1000, que realiza el control del proceso y la adquisición de datos en tiempo real conectado a un programa de computadora que registra las cantidades por medio del software LabVIEW® (PERÉZ-GIL, 2002).

Se llevaron a cabo ocho experimentos, a diferentes condiciones que se muestran en la Tabla I. Las humedades relativas HR (%) que se muestran en la tabla es un promedio de cada experimento, ya que no fue controlada.

Por cada experimento se ubican dos tablas frescas en el interior del túnel. Las tablas fueron perforadas en los extremos del corte para la introducción de termopares en el centro y a un milímetro de la superficie. Los bordes fueron sellados con silicón para que el transporte de humedad se dé solo en las caras de mayor área.

Las tablas de madera se introdujeron en el túnel de secado. Cuando las condiciones de temperatura, flujo de aire y humedad relativa fueron las requeridas, se colocaron en la jaula de tal manera que el flujo de aire fuera paralelo a las superficies de mayor área (figura 2). A una de ellas se le incorporaron termopares para medir la temperatura interna y superficial del material.

Los datos del proceso se registraron cada diez minutos por 48 horas aproximadamente, dependiendo de las condiciones de temperatura; cada experimento fue detenido al contenido de humedad aproximadamente del 5%.

Resultados y discusión

Se observó una variación en el contenido de humedad (70-130%) de las probetas y en las tablas utilizadas en las cinéticas de secado, lo cual refleja la naturaleza heterogénea y compleja del material, debido a muchos factores, entre ellos la especie, diferencias entre albura o duramen, entre ramas y tronco, altura y otras causas (TRUSCOTT, TURNER, 2005). Por lo cual el método de la curva característica es apropiado para analizar este tipo de materiales, pues estandariza las curvas para su análisis.

Los datos experimentales de todas las cinéticas de secado a diferentes condiciones fueron tratados y ajustados a una función polinómica de orden 9, para eliminar la imprecisión de la balanza del túnel de secado.

Se determinó el contenido de humedad de cada registro de peso. Utilizando el método de la curva característica se normalizaron las cinéticas de secado. Para llevar a cabo esto, se calculó un contenido de humedad reducido (adimensional) con la ecuación (1), utilizando los valores de contenido de humedad, calculando los pesos de las maderas en el túnel, registrados cada diez minutos, en el transcurso de todo el experimento.

El cálculo del contenido de humedad reducido (CH_r) se obtuvo con la ecuación (1), donde CH es el valor del contenido de humedad a tiempo t , CH_{cr} el contenido de humedad crítico, comúnmente el máximo durante toda la cinética, en la mayoría de experimentos es el contenido de humedad inicial (CH_i), y CH_e es el contenido de humedad de equilibrio a la temperatura y humedad relativa de cada experimento.

Ecuación (1)

$$CH_r = \frac{CH - CH_e}{CH_{cr} - CH_e}$$

La figura 3 muestra la variación del contenido de humedad adimensional (reducido) a diferentes temperaturas, en la cual el valor máximo para cada cinética es 1, y se puede observar que la mayoría de curvas llegan a un contenido de humedad del 4%.

El cálculo de la velocidad de secado para cada uno de los valores de la cinética se dedujo, a través de la derivada de la ecuación polinómica de orden 9, del contenido de humedad en función del tiempo de secado. Cada valor de velocidad fue dividido entre la velocidad máxima de toda la cinética (V_{ref}) para obtener la velocidad de secado reducida identificada como V_r .

Ecuación (2)

$$V_r = \frac{V}{V_{ref}} = \left(-\frac{dCH}{dt} \right)_r = f(CH_r)$$

En la fórmula anterior se observa que la velocidad de secado reducida es función del contenido de humedad reducido, por lo tanto se procede a deducir una expresión matemática para toda la cinética utilizando el concepto de derivada, con las siguientes condiciones:

Ecuación (3)

$$f(CH_r) = 0 \text{ si } CH_r = 0$$

Ecuación (4)

$$0 < f(CH_r) < 1 \text{ si } 0 < CH_r < 1$$

Ecuación (5)

$$f(CH_r) = 1 \text{ si } CH_r = 1$$

La cinética de velocidad de secado presentó 4 fases, la primera es un pequeño incremento en la velocidad debido al aumento de temperatura en la superficie del material, esta fase de secado es muy pequeña en comparación con la duración total del secado, la segunda fase presenta un decremento exponencial, y la tercera un descenso lineal en la velocidad de secado, en donde las cinéticas a temperaturas de 50 y 60°C presentan una inflexión notable entre estas dos fases, debido a la eliminación de agua libre en las cavidades celulares por capilaridad requiere menor energía que en la fase higroscópica (fase lineal), que necesita una cantidad de energía extra para romper los enlaces que mantienen adherida a la molécula de agua a la pared celular (calor de vaporización) (Ni *et al.*, 1999). En las cinéticas a temperatura de 70 a 80°C la inflexión no es muy notable, ya que a esta temperatura la presión de vapor en la fase higroscópica es alta, por lo cual la rapidez de evacuación del vapor de agua se mantiene a la misma tasa (SKAAR, 1988). La fase 4 es muy pequeña y por lo tanto no es considerada.

La figura 4 representa una función $f(CH_r)$. En donde la primera parte del gráfico muestra un comportamiento lineal que abarca desde CH_{r1} hasta CH_{r2} , estos valores de contenido de humedad reducido representan los puntos de transición entre las fases. La siguiente parte se ajusta a una función exponencial y su dominio es de CH_{r2} hasta 1.

Ecuación (6)

$$\text{si } CH_{r1} \leq CH_r \leq CH_{r2} \text{ entonces } f(CH_r) = cCH_r + d$$

Ecuación (7)

$$\text{si } CH_{r2} < CH_r \leq 1 \text{ entonces } f(CH_r) = a \exp(bCH_r)$$

Ecuación (8)

$$a = \frac{1}{\exp(b)}$$

En la parte exponencial se encuentra otra condición que se deduce a partir del valor de $CH_r=1$, y que se muestra en la ecuación (8) donde se observa que el coeficiente "a" es función de "b".

Los valores de contenido de humedad reducida en los puntos de transición han sido determinados gráficamente, siendo estos: $CH_{r1}=0,04$ y $CH_{r2}=0,30$, en todos los experimentos.

Tomando en cuenta lo observado, la función de rapidez de secado fue calculada despreciando la fase inicial y final, además, se consideraron CH_{r2} , t_2 (tiempo de transición) y V_{ref} como parámetros del modelo. A continuación se muestra la deducción del modelo.

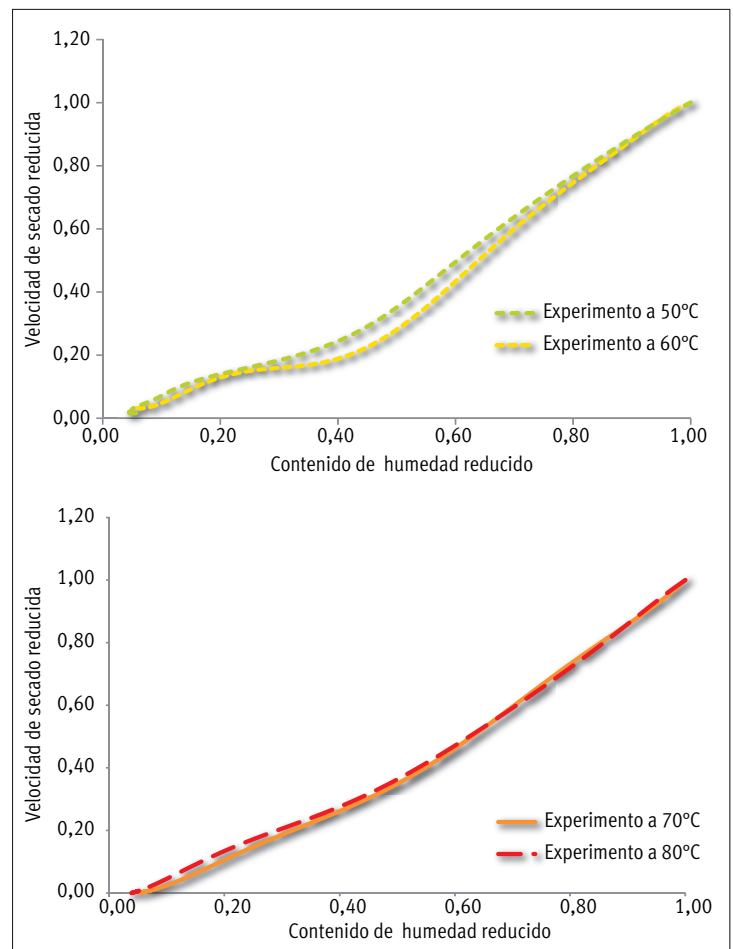


Figura 4. Gráfica de V_r reducido en función de CH_r .

Utilizando la ecuación (2) se obtiene una expresión de contenido de humedad en función del tiempo de secado, si despejamos esta ecuación y sustituimos la función de contenido de humedad para la fase lineal de CH_{r1} a CH_{r2} ecuación (6) obtendremos la siguiente expresión:

$$\text{Ecuación (9)} \\ V = V_{ref} \cdot (c \cdot CH_r + d)$$

La velocidad de secado representa la variación del contenido de humedad con respecto al tiempo, por lo tanto se sustituye esta definición en la ecuación y se incorpora CH_r por la expresión que lo define ecuación (3).

$$\text{Ecuación (10)} \\ -\frac{dCH}{dt} = V_{ref} \cdot \left[c \cdot \left(\frac{CH - CHE}{CH_{cr} - CHE} \right) + d \right]$$

Una vez establecida la ecuación diferencial, se resuelve por el método de variables separables y se calcula la constante de integración con la condición límite que se muestra abajo, obteniendo una función de contenido de humedad dependiente del tiempo ecuación (11).

$$\text{Ecuación (11)} \\ CH(t) = CHE + (CH_{cr} - CHE) \cdot \left[\left(CH_{r2} + \frac{d}{c} \right) \cdot \exp\left(-\frac{c \cdot V_{ref} \cdot (t - t_2)}{CH_{cr} - CHE}\right) - \frac{d}{c} \right]$$

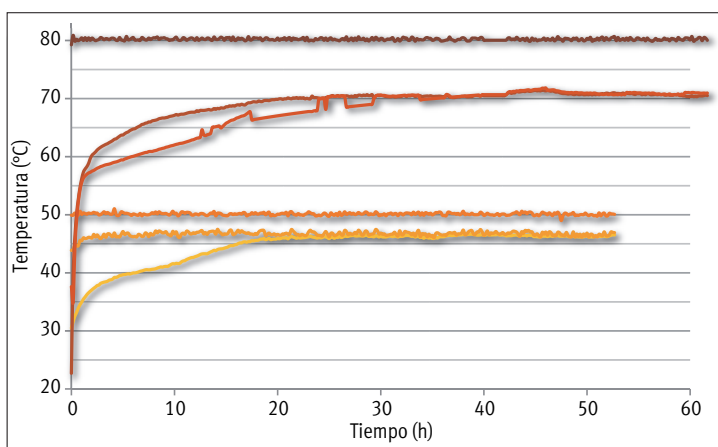


Figura 5. Perfiles de temperatura de las cinéticas de secado a 50 y 80°C.

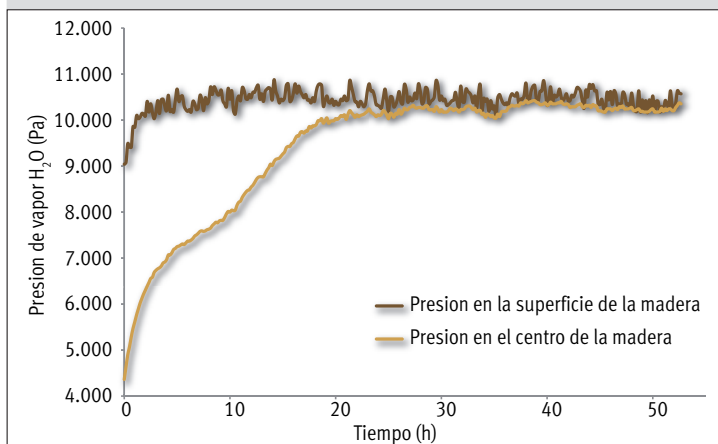


Figura 6. Presión de vapor en la superficie y el centro de la madera, experimento a 50°C.

Condiciones límite.

$$t = t_2 \quad CH_r = CH_{r2}$$

Donde t_2 representa el tiempo de transición entre las dos funciones (CH_{r2}) y depende de las condiciones de secado. Ahora, para integrar la siguiente fase, se utilizó un procedimiento similar al anterior. Se sustituye la expresión exponencial ecuación (7) en la ecuación (2) y la ecuación de contenido de humedad reducido.

$$\text{Ecuación (12)} \\ -\frac{dCH}{dt} = V_{ref} \cdot \left[a \cdot \exp\left(b \cdot \frac{CH - CHE}{CH_{cr} - CHE}\right) \right]$$

Esta ecuación diferencial se resuelve por el método anterior y se obtiene la función que modela el decremento exponencial de la velocidad de secado ecuación (13).

$$\text{Ecuación (13)} \\ CH(t) = CHE - \frac{1}{b} (CH_{cr} - CHE) \cdot \ln \left[\exp(-b \cdot CH_{r0}) + \frac{a \cdot b \cdot V_{ref} \cdot t}{CH_{cr} - CHE} \right]$$

Condiciones límite.

$$t = 0 \quad CH_r = CH_{r0}$$

En esta ecuación, CH_{r0} es el contenido de humedad reducido inicial ($CH_{r0}=1$, si $CH_{cr}=CHI$).

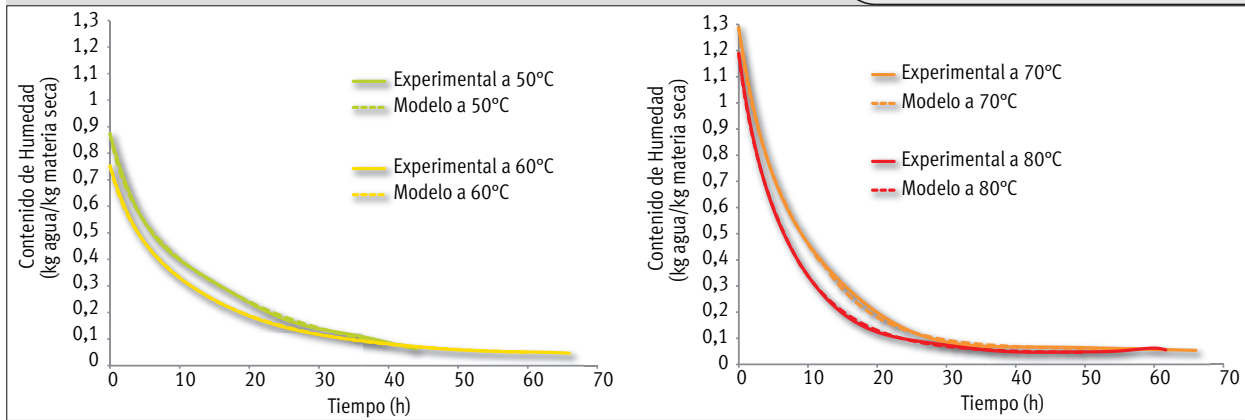
La disminución exponencial de la velocidad de la fase 2 se debe al incremento en la temperatura interna y a la eliminación de agua libre dentro del producto, como se muestra en la figura 5; el incremento lineal de la temperatura interna corresponde al decremento de la velocidad en la fase 3, el cual se relaciona con la eliminación de agua ligada en la madera, la última parte corresponde a la fase de evacuación de moléculas altamente ligadas a la monocapa (SKAAR, 1988).

Ecuación (14)

$$SE_i = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{CH_{exp} - CH_{mod}}{CH_{exp}} \right)^2 \right]$$

Los parámetros a , b , c , d del modelo se calcularon por minimización de la suma de errores cuadráticos, utilizando la ecuación (14), en cada uno de los experimentos de secado a diferentes condiciones de temperatura y humedad relativa. Donde “ n ” es el número de registros en toda la cinética de secado y CH_{exp} son los datos experimentales y CH_{mod} los del modelo.

La presión de vapor y , en específico, la presión de saturación, es la presión de la fase gaseosa o vapor de un líquido sobre la fase líquida para una temperatura determinada. Dentro de la madera existe una diferencia de temperatura entre el centro y la superficie del material, por lo tanto existe una diferencia de las presiones entre la superficie y el centro de la madera. Este gradiente está relacionado directamente con la tasa de pérdida de humedad de la madera. El potencial originado por diferencia de presión de vapor disminuye con los incrementos logarítmicos de la presión de vapor, figura 6, definidos por la ecuación de Antoine (HOWELL, BUCKIUS, 1990). Además, el incremento de la presión de vapor está relacionado con la rapidez de secado, pues una mayor presión de vapor incrementa la presión capilar en la madera, la cual es afectada también por la permeabilidad del material.

**Figura 7.**

(Izquierda) Comparación de los datos del modelo con los experimentales para las temperaturas de secado de 50 y 60°C. (Derecha) Comparación de los datos del modelo con los experimentales para las temperaturas de secado de 70 y 80°C.

Tabla II,
Parámetros calculados del modelo de la curva característica de secado,

Temperatura (°C)	$C_{Hr} > 0,3$			$C_{Hr} \leq 0,3$	
	a	b	Vref	c	d
50	0,05435	3,29029	0,09317	0,50402	0,012621
60	0,06636	2,89990	0,08921	0,52789	-0,01611
70	0,09887	2,47916	0,17391	0,92606	-0,03565
80	0,112621	2,31347	0,19406	0,74926	-0,02698

Conclusiones

A medida que el secado avanza, la diferencia de presión tiende a disminuir debido a la homogenización en la temperatura de todo el material y, por lo tanto, deja de intervenir en la disminución de la tasa del secado y comienza una competencia entre difusión de agua ligada y convección de vapor (TURNER, 1996).

En la tabla II se muestran los parámetros calculados del modelo para un contenido de humedad reducido menor de 0,3, que corresponden a la fase exponencial y para un contenido de humedad reducida mayor o igual a 0,3 en la fase lineal.

En la figura 7, se muestran las cinéticas de secado experimentales comparadas con las simuladas por el modelo, a diferentes temperaturas usando los parámetros de la tabla II. El modelo simula satisfactoriamente las curvas experimentales con un máximo error de 0,023 kg de agua/kg de materia seca, en todas las curvas. Nótese que cada una de ellas comienza con un contenido de humedad inicial diferente.

Con respecto a la calidad final de las muestras de madera, podemos decir que estas no sufrieron un daño considerable (figura 8). El Pino Pseudostrobus es una madera fácil de secar, pues tolera condiciones de secado intensas (humedades relativas bajas). En la figura 8 se muestran algunas muestras después del secado. Como puede observarse, no se presentaron grietas, ni rajaduras, la calidad es aceptable.

Basado en el método de la curva característica, se obtuvo un modelo matemático que simula la cinética de secado de madera *Pinus pseudostrobus* por convección de aire caliente. El desarrollo del modelo parte del análisis de datos experimentales y de la identificación de fases. Para la simulación de las cinéticas es necesario contar con los parámetros del modelo (a, b, c y d), la velocidad de referencia y el tiempo de transición entre fases, estos últimos diferentes para cada temperatura. Los parámetros del modelo se estimaron reduciendo la suma de errores cuadráticos, obteniendo un error máximo de 0,023 kg de agua/kg de materia seca, entre las cinéticas experimentales y las simuladas.

Una de las ventajas de este modelo es que no requiere las propiedades del material para el cálculo de las cinéticas; además, son pocos los parámetros utilizados en la simulación a diferente temperatura, lo que facilita los tiempos de cómputo. Sin embargo, dichos parámetros no tienen algún significado físico evidente, ya que engloban muchos factores que intervienen en el secado de madera.

La incorporación de fases en el modelo nos permite establecer un preámbulo a la comprensión de los mecanismos de transporte de humedad propuestos por WHITAKER (1987). La segunda parte del trabajo de investigación a realizar estará orientado a desarrollar un modelo fenomenológico de secado de madera que involucre ecuaciones diferenciales de transferencia de calor, masa y momentum con fundamentos termodinámicos.

Referencias bibliográficas

AHMADI A., QUINTARD M., WHITAKER S., 1998. Transport in chemically and mechanically heterogeneous porous media. Two-equation model for solute transport with adsorption. *Advances in Water Resources*, 22 (1): 59-86.

COUMANS W., 2000. Models for drying kinetics based on drying curves of slabs. *Chemical Engineering and Processing*, 39 (1): 53-68.

DIN (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG EV), 1992. Norm DIN 52183. Beuth Verlag GmbH, Berlin/Koln, Alemania.

HOWELL J., BUCKIUS R., 1990. Principios de termodinámica para ingenieros. Primera edición español, McGraw Hill, USA.

JANNOT Y., TALLA A., NGANHOU J., PUIGGALI J. R., 2004. Modeling of Banana Convective Drying by the Drying Characteristic Curve (DCC) Method. *Drying technology*, 22 (8): 1949-1968.

NI H., DATTA A. K., TORRANCE K. E., 1999. Moisture transport in intensive microwave heating of biomaterials: a multi-phase porous media model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42 (8): 1501-1512.

PEREZ-GIL J., 2002. Análisis y selección de un sistema de medición y control para un túnel de secado de Madera. Instituto Tecnológico de Oaxaca.

PERRE P., TURNER I. W., 2006. A Dual-Scale Model for Describing Drier and Porous Medium Interactions. *AIChE*, 52 (9): 3109-3117.

SKAAR C., 1988. *Wood-Water Relations* (2nd Printing). Springer series in wood Science, Berlin.

TRUSCOTT S., TURNER I., 2005. A heterogeneous three-dimensional computational model for wood drying. *Applied Mathematical Modelling*, 29 (4): 381-410.

TURNER I., 1996. A two dimensional orthotropic model for simulating wood drying processe. *Applied Mathematical Modelling*, 20 (1): 60-81.

WHITAKER S., 1977. Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media: a theory of drying. *Advances in Heat Transfer*, 13 (1): 119-203.



Figura 8.
Calidad de las maderas al final del secado.



VERNAZZA-LICHT N. (DIR.), GRÉNAÏS M. E. (DIR.), BLEY D. (DIR.), 2010. **SOCIÉTÉS, ENVIRONNEMENTS, SANTÉ.** FRANCE, IRD, 364 P.

À partir de zones géographiques situées tant au Sud qu'au Nord, les auteurs de cet ouvrage présentent un large éventail de configurations dans lesquelles s'exprime la complexité des relations entre santé et environnements dans leur rapport avec les groupes humains. Ils mettent l'accent sur l'importance de la perception et de la pratique des acteurs (des décideurs aux bénéficiaires des mesures, en passant par les médecins) pour penser le risque sanitaire selon les milieux. Ils soulignent tout l'intérêt de l'apport des sciences sociales et des pratiques interdisciplinaires dès lors qu'il s'agit d'envisager les relations entre un pathogène et l'homme. Chacune des approches s'attache ainsi à éclairer les différentes facettes du risque environnemental, depuis le comportement des individus jusqu'aux politiques nationales.

IRD Éditions,
32, avenue Henri Varagnat,
93143 Bondy Cedex, France.
www.ird.fr/editions/
Adapté du résumé de l'éditeur.



BEISEL J. N., LEVÊQUE C., 2010. **INTRODUCTIONS D'ESPÈCES DANS LES MILIEUX AQUATIQUES : FAUT-IL AVOIR PEUR DES INVASIONS BIOLOGIQUES ?** FRANCE, ÉDITIONS QUÆ, VII-232 P.

Les introductions d'espèces, au cœur de l'actualité écologique, sont souvent perçues soit comme une menace, soit comme un phénomène inéluctable auquel il convient de s'adapter. Doit-on réellement craindre les invasions biologiques ? Principalement axé sur les milieux aquatiques continentaux, cet ouvrage développe quelques bases conceptuelles sur la mise en place des peuplements pour discuter ensuite des conditions dans lesquelles les espèces exotiques se naturalisent. La question des conséquences de ces naturalisations sur les écosystèmes d'accueil est aussi traitée. Un chapitre est dévolu à une analyse des représentations sociales des introductions d'espèces et des prémisses idéologiques qui sous-tendent les travaux d'écologie relatifs aux invasions biologiques.

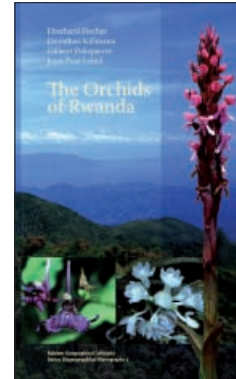
Éditions Quæ, c/o Inra, RD 10,
78026 Versailles Cedex, France.
www.quæ.com
Adapté du résumé de l'éditeur.



GOBAT J. M., ARAGNO M., MATTHEY W., 2010. **LE SOL VIVANT : BASES DE PÉDOLOGIE, BIOLOGIE DES SOLS.** SUISSE, PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES, XXIV- 817 P.

Le livre, à la fois manuel et ouvrage de référence, comprend près de 1 500 définitions de termes scientifiques et plus de 1 200 renvois bibliographiques et de nombreux cas concrets. Il est conçu en trois parties : la première fournit les connaissances essentielles de pédologie générale, avec un accent particulier sur les aspects biologiques du sol. Elle présente successivement les constituants et les propriétés du sol, puis leurs effets sur les processus de formation et d'évolution. La deuxième traite des divers types de relations qui s'établissent entre les organismes et le sol. Elle s'intéresse par exemple à la décomposition du bois mort, à la formation de la tourbe, au compostage ou à la bioremédiation. Une large place est faite également à la systématique et à l'écologie des animaux du sol ou à celles de la végétation. Enfin, la troisième partie met l'accent sur les mécanismes biologiques du fonctionnement des sols, comme le rôle des enzymes, les réseaux trophiques, les symbioses bactériennes et mycorhiziennes, ou encore l'activité de la rhizosphère. Dans cette troisième édition, deux nouveaux chapitres ont été rédigés : l'un rassemble tous les aspects liés à la biodiversité, aux niches écologiques, aux stratégies adaptatives et à la bioindication ; l'autre traite de la place du sol au cœur des cycles biogéochimiques. D'autres thèmes ont été fortement revus et développés, comme l'application des méthodes moléculaires à la biologie du sol, la biominéralisation, le rôle de la crotte dans les chaînes de décomposition, la micromorphologie des sols, l'échantillonnage de la faune ou encore la classification des formes d'humus et des sols, avec une présentation plus approfondie de la WRB (World Reference Base for Soil Resources).

Presses polytechniques
et universitaires romandes, EPFL,
Rolex Learning Center, CP 119,
1015 Lausanne, Suisse.
www.ppur.org
Adapté du résumé de l'éditeur.



FISCHER E., KILLMANN D., DELEPIÈRE G., LEBEL J. P., 2010. **THE ORCHIDS OF RWANDA.** GERMANY, INSTITUTE FOR INTEGRATED NATURAL SCIENCES, 439 P.

Illustrated by colour photographs and colour drawings, this book is the first complete field guide to the orchids of East Africa. Introductory chapters deal with orchid research, habitats, plant geography of Rwanda, and orchid biodiversity in Rwanda and Africa. Conservation, morphology, flower biology and systematics are dealt with, and keys to genera and species are given. The main part offers data of the species in alphabetical sequence (descriptions, flowering times, habitat, distribution in Rwanda and Africa, plus at least one coloured illustration per plant).

Department of Biology, Institute for Integrated Natural Sciences, University Koblenz-Landau, Universitätsstrasse 1, 56070 Koblenz, Germany.
www.uni-koblenz-landau.de
Adapted from the publisher's summary.



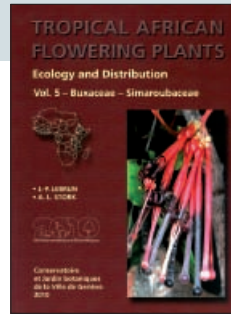
ITTO, 2010. **THE PROS AND CONS OF PROCUREMENT: DEVELOPMENTS AND PROGRESS IN TIMBER-PROCUREMENT POLICIES AS TOOLS FOR PROMOTING THE SUSTAINABLE MANAGEMENT OF TROPICAL FORESTS.** JAPAN, ITTO, 108 P.

The study reviews developments and progress regarding timber procurement policies. It assesses the positive and negative impacts of these policies, analyses the main similarities and differences among timber procurement policies, indicates the extent to which suppliers in ITTO member countries are able to meet the requirements and costs of these policies, and evaluates the need and desirability for as well as the practicality of promoting convergence and coordination among timber procurement policies as a means of facilitating the international trade in tropical timber.

ITTO, International Organizations Center, 5th Floor, Pacifico-Yokohama, 1-1-1, Minato-Mirai, Nishi-ku, Yokohama, 220-0012, Japan.

www.itto.int

Adapted from the publisher's summary.

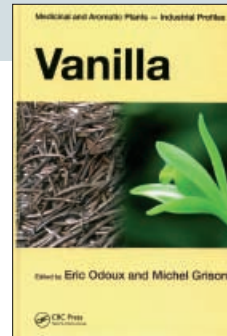


LEBRUN J. P., STORK A. L., 2010. **TROPICAL AFRICAN FLOWERING PLANTS: ECOLOGY AND DISTRIBUTION. 5. BUXACEAE.** SUISSE, CONSERVATOIRE ET JARDIN BOTANIQUES DE LA VILLE DE GENÈVE, 415 P.

Le volume présente 30 familles, 179 genres et 1 415 espèces, chacune étant cartographiée, accompagnée d'une description simplifiée et de son écologie. Plusieurs familles sont difficiles et vastes : la plus importante est celle des Vitaceae (287 espèces), comprenant en particulier le genre complexe *Cyphostemma*, riche à lui seul de 177 espèces dont beaucoup sont insuffisamment connues, sans compter 24 autres trop peu connues pour être munies d'un binôme ; de plus, ces plantes présentent des habitats fort variés : herbes érigées, herbes lianescentes, plantes prostrées ou succulentes atteignant 2,50 m de hauteur, etc. La deuxième famille importante est celle des Loranthaceae (226 espèces) regroupant des hémiparasites ; vient ensuite celle des Moraceae (162 espèces) dont le genre *Dorstenia* (58 espèces) avec des entités difficiles à séparer, ce qui les rapproche des espèces apomictiques ou autogames. En plus, les Hippocrateaceae (139 espèces) sont souvent peu connues et trop peu récoltées. Conservatoire et jardin botaniques de la ville de Genève, 1, chemin de l'Impératrice, Case postale 60, 1292 Chambésy, Genève, Suisse.

www.ville-ge.ch

Adapté du résumé de l'éditeur.



ODOUX E., GRISONI M. (EDS), 2010. **VANILLA.** UNITED KINGDOM, CRC PRESS, XXIV-387 P.

Vanilla is a legacy of Mexico and, like chocolate, it is a major global delicacy representing almost a half-billion euros in profits each year. Written under the editorial guidance of renowned field authorities, by 45 international experts with vast experience in their respective fields, this book presents up-to-date reviews on the cultivation, curing, and uses of vanilla. It provides unique and comprehensive coverage of the biology of the vanilla vine, the properties of its aromatic beans, and production processes worldwide. This globally relevant resource discusses biotechnology aimed at finding novel production methods of vanilla and horticultural studies for improving yields and increasing plant resistance. It analyzes entomological issues related to pollination, studies on the chemistry and biochemistry of the curing process, and the advanced analytical chemistry needed to identify adulterations such as vanillin-spiked pods and synthetic vanillin. It also explores the relationship between fruit development anatomy and flavor quality. Vanilla is a universally appreciated flavor that is consumed worldwide.

CRC Press-Taylor and Francis Group, 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon, OX14 4RN, United Kingdom.

www.crcpress.com

www.taylorandfrancis.com

Adapted from the publisher's summary.



OSTROM E., 2010. **GOVERNANCE DES BIENS COMMUNS. POUR UNE NOUVELLE APPROCHE DES RESSOURCES NATURELLES.** BELGIQUE, DE BOECK, 301 P.

La question de la gouvernance des ressources naturelles utilisées conjointement par de nombreux individus revêt une importance croissante pour les analystes politiques. Tant la nationalisation que la privatisation ont été mises en avant mais ni l'État ni le marché n'ont été uniformément en mesure de résoudre les problèmes liés aux ressources communes. Remettant en question les fondements de l'analyse politique telle qu'appliquée aux ressources naturelles, Elinor Ostrom fournit dans cet ouvrage un ensemble unique de données empiriques afin d'étudier les conditions dans lesquelles des problèmes de ressources communes ont été résolus, de manière satisfaisante ou non. Le Dr Ostrom décrit d'abord les trois modèles les plus fréquemment utilisés en tant que fondements pour préconiser des solutions se basant sur l'État ou le marché. Elle passe ensuite en revue les alternatives théoriques et empiriques à ces modèles afin d'illustrer la diversité des solutions possibles. Dans les chapitres suivants, elle fait appel à l'analyse institutionnelle en vue d'examiner diverses stratégies – fructueuses ou infructueuses – de gouvernance des biens communs. Contrairement à ce qu'affirme l'argument de la « tragédie des biens communs », les problèmes de ressources communes peuvent être résolus par des organisations volontaires plus efficacement que par un État coercitif. Parmi les cas considérés figurent la tenure communale de prairies et de forêts, des communautés d'irrigation, des droits relatifs à l'eau ainsi que des sites de pêche. La gouvernance des biens communs apporte une contribution majeure à la littérature analytique et à notre conception de la coopération humaine.

De Boeck, Fond Jean-Pâques 4, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique.

www.deboeck.com

Adapté du résumé de l'éditeur.



GUILLOT G., 2010. **LA PLANÈTE FLEURS**. FRANCE, ÉDITIONS QUÆ, 207 P.

Depuis quand la Terre est-elle la planète fleurie que nous connaissons ? Apparues il y a quelque 150 millions d'années, date récente à l'échelle des temps géologiques, les plantes à fleurs ont connu une extraordinaire diversification dans le cadre de l'évolution et comptent actuellement près de 230 000 espèces ! Elles ont changé la face de notre planète et règnent désormais en maître dans la végétation. Leur succès tient avant tout à une innovation géniale dédiée à la reproduction : la fleur. Pourquoi certaines espèces déploient-elles des corolles somptueuses alors que d'autres se contentent de fleurs à l'esthétique plus ordinaire ? Quelles relations se sont tissées au fil du temps avec des partenaires tels que les insectes ? Qu'est-ce que la pollinisation ? Autant de questions passionnantes que cet ouvrage s'attache à approfondir en s'appuyant sur des exemples d'espèces sauvages ou cultivées, connues de tous. Cette approche naturaliste, éclairée par les recherches scientifiques les plus récentes, se situe dans une perspective résolument évolutive et révèle la multiplicité des structures florales acquises et retenues au cours de l'histoire des plantes à fleurs. La classification phylogénétique (selon les parentés) sert de fil conducteur à cette exploration jalonnée de couleurs, d'odeurs et de formes les plus extravagantes.

Éditions Quæ, c/o Inra, RD 10, 78026 Versailles Cedex.

www.quæ.com

Adapté du résumé de l'éditeur.



LAMARQUE F., ANDERSON J., FERGUSSON R. *ET AL.*, 2010. **LES CONFLITS HUMAINS-FAUNE EN AFRIQUE : CAUSES, CONSÉQUENCES ET STRATÉGIES DE GESTION**. ITALIE, FAO, 112 P.

Les conflits entre les humains et la faune sauvage existent depuis l'aube de l'humanité. Ils se produisent sur tous les continents, dans les pays industrialisés comme dans les pays en développement, même si les problèmes varient en fonction du contexte particulier et du mode de vie des populations. Cette publication met l'accent sur l'Afrique, où les problèmes sont particulièrement fréquents et aigus en raison de l'accroissement de la population humaine, de l'extension des infrastructures routières et du développement de l'agriculture et des activités industrielles, qui ont conduit à une plus grande colonisation par les humains de régions autrefois sauvages et inhabitées. La compétition pour les habitats et les ressources naturelles disponibles s'est amplifiée. Les effets du changement climatique exacerbent encore ces conflits. La présente publication vise à faciliter la coexistence entre les humains et la faune sauvage et à aider les communautés affectées par les conflits à appliquer de bonnes stratégies de gestion. Il n'y a pas de solution simple. Différents contextes, différentes croyances et différentes valeurs doivent être pris en compte pour identifier les meilleures approches.

FAO, Bureau de l'échange des connaissances, de la recherche et de la vulgarisation, Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, Italie.

www.fao.org

Adapté du résumé de l'éditeur.



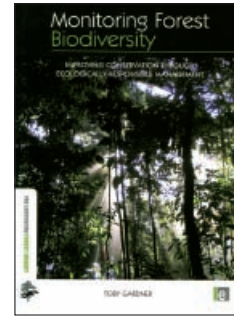
BERTE C. J., MOHAMED M. O. (COLLAB.), SALECK M. O. (COLLAB.), 2010. **LUTTE CONTRE L'ENSABLEMENT : L'EXEMPLE DE LA MAURITANIE**. ITALIE, FAO, IX-76 P.

L'un des principaux défis de la désertification est l'ensablement, qui a des conséquences environnementales et socio-économiques désastreuses. Il réduit les superficies de terres arables et de pâturages et la disponibilité des ressources en eau, menaçant ainsi la productivité et les rendements agricoles, de même que la sécurité alimentaire et le niveau de vie des populations locales. La Mauritanie, l'un des pays d'Afrique subsaharienne les plus touchés, a acquis au cours de plusieurs décennies une grande expérience dans le domaine de la lutte contre l'ensablement. La présente publication fait la synthèse des enseignements tirés, notamment dans la mise en œuvre d'un projet pour la réhabilitation et l'extension de la ceinture verte de Nouakchott, projet couronné de succès et récemment terminé. Ces enseignements peuvent s'appliquer à d'autres pays qui se heurtent à des défis semblables.

FAO, Bureau de l'échange des connaissances, de la recherche et de la vulgarisation, Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, Italie.

www.fao.org

Adapté du résumé de l'éditeur.



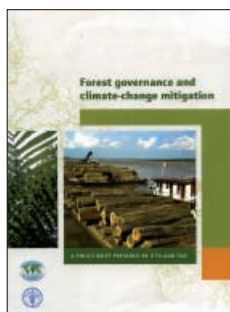
GARDNER T., 2010. **MONITORING FOREST BIODIVERSITY: IMPROVING CONSERVATION THROUGH ECOLOGICALLY-RESPONSIBLE MANAGEMENT**. UNITED KINGDOM, EARTHSCAN PUBLICATIONS, XXVII-360 P.

The fate of much of the world's terrestrial biodiversity depends upon our ability to improve the management of forest ecosystems that have already been substantially modified by humans. Monitoring is an essential ingredient in meeting this challenge, allowing us to measure the impact of different human activities on biodiversity and identify more responsible ways of managing the environment. Nevertheless many biodiversity monitoring programs are criticised as being little more than "tick the box" compliance exercises that waste precious resources and erode the credibility of science in the eyes of decision makers and conservation investors. The purpose of this book is to examine the factors that make biodiversity monitoring programs fail or succeed.

Earthscan, Dunstan House, 14a St Cross Street, London EC1N 8XA, United Kingdom.

www.earthscan.co.uk

Adapted from the publisher's summary.



OIBT, FAO, 2009. **FOREST GOVERNANCE AND CLIMATE-CHANGE MITIGATION.** JAPAN, ITTO, 11 P.

This Policy brief summarizes the main findings of five workshops that aimed to promote a multi-sectoral dialogue among countries on improving forest law compliance. It highlights lessons learned from experiences on the ground and sets out the key elements of an approach to forest law compliance and governance that will ensure the optimal role of forests in mitigating climate change. The key messages that emerged from the five workshops, which were jointly funded and convened by ITTO and FAO in Southeast Asia, West Africa, Central Africa, the Amazon Basin and Mesoamerica between August 2006 and July 2008, include that: forest-related laws need to be harmonized with those in other sectors; and reducing emissions from deforestation and forest degradation in developing countries (REDD) requires effective forest governance and clarifying rights to land, forests and carbon. The policy brief highlights the causes of poor forest law compliance, including failings in the policy and legal frameworks, insufficient enforcement, lack of information, corruption, and market distortions. It also states that REDD initiatives should build on the lessons learned through forest law enforcement, governance and trade initiatives.

ITTO - International Organizations Center, 5th Floor, Pacifico-Yokohama, 1-1-1, Minato-Mirai, Nishi-ku, Yokohama, 220-0012, Japan.
www.itto.int

Adapted from the publisher's summary.



OIBT, FAO, 2009. **GIFTS FROM THE FOREST: REPORT OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF NON-TIMBER FOREST PRODUCTS AND SERVICES.** JAPAN, ITTO, 50 P.

This report of the international conference on the sustainable development of non-timber forest products and services held in Beijing, China presents an overview of the global non-timber forest products and services sector, considerations regarding the growing significance of community forest enterprises in the production of forest products and services, and discussions on policy and practical issues related to the development of markets for carbon and other forest services.

ITTO - International Organizations Center, 5th Floor, Pacifico-Yokohama, 1-1-1, Minato-Mirai, Nishi-ku, Yokohama, 220-0012, Japan.

www.itto.int

Adapted from the publisher's summary.



ITTO, FAO, 2010. **GOOD NEIGHBOURS: PROMOTING INTRA-AFRICAN MARKETS FOR TIMBER AND TIMBER PRODUCTS. INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PROMOTION OF INTRA-AFRICA TRADE IN TIMBER AND TIMBER PRODUCTS, 2009-06-30/2009-07-02, ACCRA, GHANA.** JAPAN, ITTO, 112 P.

The publication contains the proceedings from the International Conference on the Promotion of Intra-Africa Trade in Timber and Timber Products convened in Accra, Ghana in July 2009, and the outcomes of a 2009 study on the regional trade in tropical timber and timber products in Africa, which explored opportunities to further promote the regional trade of forest products from sustainably managed sources.

ITTO - International Organizations Center, 5th Floor, Pacifico-Yokohama, 1-1-1, Minato-Mirai, Nishi-ku, Yokohama, 220-0012, Japan.

www.itto.int

Adapted from the publisher's summary.



MOUSDALE D. M., 2010. **INTRODUCTION TO BIOFUELS.** UNITED KINGDOM, CRC PRESS, 429 P.

Providing complete coverage of biofuels, this new textbook discusses the multidisciplinary study of bioenergy and the potential for replacing fossil fuels in the coming decades. Presenting numerous examples throughout the text, this book explores key technologies, including biotechnology and genetic reprogramming of microorganisms. The author also examines the future of chemistry from a broader perspective, addressing the economic, social, and environmental issues that are extremely important to any study of bioenergy as a route to sustainable development.

CRC Press-Taylor & Francis, 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon, OX14 4RN, United Kingdom.

www.taylorandfrancis.com

Adapted from the publisher's summary.



THOMAS F. (DIR.), LEFÈVRE T. (DIR.), RAYMOND M. (DIR.), 2010. **BIOLOGIE ÉVOLUTIVE.** FRANCE, DE BOECK, XXII-814 P.

Le livre s'adresse aux étudiants de master, aux chercheurs, à tous ceux qui s'intéressent de près ou de loin à la biologie évolutive. Un de ses points forts est d'offrir un panorama moderne de ce qu'est vraiment la biologie évolutive de ce début du XXI^e siècle. Il est une invitation à découvrir la biologie évolutive, aussi bien au travers de l'élégance de sa formulation, l'étendue de ses applications, que par la complexité de ses dérivations.

Éditions De Boeck, 2 ter, rue des Chantiers, 75005 Paris, France.

www.deboeck.com

Adapté du résumé de l'éditeur.