

EXTRACCIÓN DE NUTRIMENTOS EN PLANTACIONES DE JAÚL (*Alnus acuminata*) EN LA CUENCA DEL RÍO VIRILLA, COSTA RICA.¹

Manuel Segura*, Álvaro Castillo**, Alfredo Alvarado ^{2/}*, Fabio Blanco***

Palabras clave: Concentración de nutrimentos, extracción de nutrimentos, biomasa aérea, jaúl, *Alnus acuminata*.
Keywords: Nutrient concentration, nutrient extraction, above ground biomass, alder, *Alnus acuminata*.

Recibido: 24/05/05

Aceptado: 08/08/05

RESUMEN

El motivo del presente trabajo es ampliar el conocimiento sobre la extracción de nutrimentos de *A. acuminata* en plantaciones entre 2 y 7 años de edad, en suelos Typic Udivitrands (Landelina y Vista de Mar) y Entic Udivitrands (Matinilla). Se encontró que la variación de la concentración de todos los elementos varía en función del tipo de tejido. Los contenidos de N, P, Mg y S de *A. acuminata* disminuyen en el orden: hojas>ramas secundarias>ramas principales>tallo. La concentración de K, Cu y Mn disminuyó en un orden similar al anterior, excepto para ramas principales y tallo, los cuales tenían una concentración similar. El B y el Ca tienen una mayor concentración en las hojas y ramas secundarias, entre las cuales no hay diferencias, mientras que se encontraron en menor cantidad en las ramas principales y el tallo. La concentración de Zn fue mayor en las ramas secundarias que en las hojas y disminuyó en el orden de ramas secundarias>hojas>ramas principales>tallo. El contenido de Fe en las hojas fue mayor que en las otras secciones comparadas de la biomasa aérea del árbol, entre las cuales no hubo diferencia. Indiferentemente del tejido estudiado y de la edad de la plantación, la concentración porcentual de los macronutrimentos en jaúl descendió en el

ABSTRACT

Nutrient extraction by *Alnus acuminata* plantations at the Virilla river watershed, Costa Rica. The objective of this study is to improve on the knowledge about nutrient extraction by components of above ground biomass of *A. acuminata* in plantations of 2 to 7 years of age growing on Typic Udivitrands (Landelina and Vista de Mar sites) and Entic Udivitrands (Matinilla site). The concentration of all the elements changes among the different alders' tissues; the contents of N, P, Mg and S decreased in the order: leaves>secondary branches>main branches>trunk. The concentration of K, Cu and Mn diminished as mentioned above, except that the main branches and the trunk showed similar concentrations. The B and the Ca concentrations were larger in the leaves and secondary branches, but their concentrations did not differ significantly; smaller quantities of B and the Ca were found in the main branches and the trunk. Considering together data from trees of all tissues studied and of plantation ages, the concentration percentage of the macronutrients in alder descended in the order: N>K>Ca>P≈Mg>S. The concentration of Zn was larger in the secondary branches than in the leaves and diminished in the order: secondary branches>leaves>main branches>trunk. The

1/ Este trabajo forma parte de la tesis de M.Sc. del primer autor. Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Agroalimentarias. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

2/ Autor para correspondencia. Correo electrónico: alfredo@carari.ucr.ac.cr

* Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica.

** Compañía Nacional de Fuerza y Luz, San José, Costa Rica.

*** Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.

orden: N>K>Ca>P≈Mg>S y la de los micronutrientes en el orden: Fe>Zn>Mn>Cu>B. De los tejidos estudiados hasta los 2 años de edad, la copa y el tallo tienen biomásas comparables; a partir del cuarto año el tallo conforma la mayor parte de la biomasa aérea y por ende de los nutrientes absorbidos, seguido por las ramas principales, las hojas y las ramas secundarias. La extracción total de nutrientes en las plantaciones de *A. acuminata* se dio en el orden de N>K>Ca>P>Mg>S y de Fe>Zn>Mn>Cu>B.

content of Fe in the leaves was larger than the found in other tissues of the above biomass, among which there were no differences. The abundance of the micronutrients, descended in the order: Fe>Zn>Mn>Cu>B, despite the tissue type or the age of the plantation. Up to the second year age of the plantation, both crown and trunk biomasses are similar. After age 4, growth of the trunk becomes dominant and nutrient accumulation in this component of the biomass becomes more abundant, followed by the main branches, the leaves and the secondary branches. The total extraction of nutrients in the plantations of *A. acuminata* followed the order of N>K>Ca>P>Mg>S and of Fe>Zn>Mn>Cu>B.

INTRODUCCIÓN

El jaúl (*Alnus acuminata* (H.B.K.) O. Kuntze) es la especie más utilizada en la reforestación de la parte alta de la cuenca del río Virilla del Proyecto de Mejoramiento Ambiental de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL), en los cantones de Coronado y Goicoechea.

Desde el punto de vista de las ciencias del suelo, los árboles de jaúl se utilizan para controlar la erosión y recuperar áreas donde el suelo está muy deteriorado, debido a que crecen muy bien en laderas y su sistema radical tiende a ser lateral y extendido. Además, el jaúl se utiliza para producción de madera para leña, construcción de puentes y pilotes, aserrío, embalaje, construcción, ebanistería y fabricación de madera contrachapada (CATIE 1984, 1986, Russo 1990). Otros usos son, como regeneración natural, para sostener los cortes de caminos, y la Compañía Nacional de Fuerza y Luz lo utiliza para mejorar la calidad y cantidad de agua en la cuenca alta del río Virilla.

A. acuminata crece en forma natural, y se cultiva en las zonas altas y húmedas de América Central y América del Sur, se caracteriza por tener un porte medio y crecimiento rápido. Esta especie se desarrolla bien en suelos profundos,

bien drenados, limosos o limo arenosos de origen aluvial o volcánico, aunque puede crecer en suelos pobres que van desde arenosos hasta arcillosos (CATIE 1984, 1986).

En Costa Rica, el jaúl se encuentra en las zonas altas en combinación con pastos como el kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), elefante (*P. purpureum*) y *Axonopus* spp. (CATIE 1986, Russo 1990, 1995, Budowski y Russo 1997). Estos sitios se caracterizan por la presencia de suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles), con una alta capacidad para fijar el P adicionado (entre 5,5 y 99,9%) y una fertilidad natural de baja a media, por lo que según Alvarado *et al.* (2001), es necesario adicionar fertilizantes para maximizar la producción de los cultivos.

El valor comercial de los árboles de jaúl se basa en la alta producción de biomasa por unidad de área, con un reducido requerimiento de fertilizantes nitrogenados y un aumento en la productividad de sitios deficientes en N (Gordon y Dawson 1979). La tasa de fijación de N atmosférico en plantas actinorrizales es semejante a la observada con plantas leguminosas y puede superar los 100 kg ha⁻¹ año⁻¹ de N, cantidad similar al N agregado como fertilizante al año en el manejo de explotaciones forestales intensivas (Cervantes y Rodríguez 1992).

Existe información acerca de la concentración de macronutrimentos en los tejidos de *A. nepalensis* en regiones subtropicales del este del Himalaya (Sharma 1993 y Sharma *et al.* 2002). Sin embargo, no se conoce sobre la concentración de nutrimentos ni sobre la extracción total de los mismos por las diferentes fracciones de la biomasa aérea en plantaciones de *A. acuminata* en el trópico, lo que motivó el presente trabajo, con el fin de ampliar este conocimiento y mejorar el manejo en plantaciones de 2, 4 y 7 años de edad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Variables ambientales

Los sitios de estudio se ubican en Andisoles de los cantones Vásquez de Coronado y Goicoechea, en relieves planos con ondulaciones de moderadas a fuertes, en la zona de vida Bosque Muy Húmedo Montano Bajo (bmh-MB), a una elevación entre 1542 y 2062 msnm. La precipitación promedio anual es de 2500 mm y la temperatura media oscila entre 12 y 22,5°C. La humedad relativa de la zona es alta y la neblina es frecuente, con vientos leves (Montoya 1999). El estudio se realizó en plantaciones de *A. acuminata* de 2 (Landelina, suelo Typic Udivitrands), 4 (Vista de Mar, suelo Typic Udivitrands), y 7 años de edad inicial (Matinilla, suelo Entic Udivitrands) consideradas como de crecimiento excelente, según los criterios desarrollados por Camacho y Murillo (1986). Se escogieron plantaciones de edad creciente, con el fin de establecer una “serie de tiempo falsa” que permitiera medir en un tiempo corto las variables de crecimiento del jaúl.

Las principales variables de fertilidad de los 3 sitios comparados, los cuales fueron muestreados por horizontes, reflejaban una disminución importante del contenido de materia orgánica entre el horizonte superior y los demás horizontes. También se observaron cambios texturales abruptos entre horizontes del suelo en la plantación de Landelina (Cuadro 1). Del cuadro 1, se infiere que en los primeros 30 cm

de suelo el pH y los contenidos de P, Zn, Fe y Cu disponibles son adecuados y de estos el P, Fe y el Zn se encuentran en mayor cantidad en la plantación de 7 años; mientras que los contenidos de Mn son bajos. Los niveles disponibles de bases son bajos ($Ca > Mg > K$), aunque más elevados en el horizonte A desarrollado en cenizas volcánicas recientes y la CICE tiende a ser baja ($< 5 \text{ cmol (+) l}^{-1}$).

Variables de biomasa

De cada plantación de 2, 4 y 7 años de edad, se cortó 3 árboles dominantes, sembrados originalmente a una distancia de 3,5x3,5 m, para una densidad inicial de 816 árboles ha^{-1} . En cada árbol se separaron las fracciones: hojas, ramas principales, ramas secundarias (ramas pequeñas) y tallos (troncos). Las hojas se separaron de las ramas en forma manual; las ramas secundarias se seccionaron de las ramas principales en forma manual o con tijera de podar y las ramas principales se separaron del tallo con el uso de cuchillo o motosierra dependiendo de su grosor. A cada tejido se le determinó el peso fresco total en forma individual. De cada tejido se tomó una submuestra, para lo que se homogenizaron los tejidos y en el caso de las ramas principales y del tronco se cortaron secciones (galletas) de la parte apical, media y basal para formar la submuestra compuesta de estos tejidos. Las submuestras se identificaron, pesaron en fresco y transportaron al Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica, donde se colocaron en una estufa a 70°C por un período de 48 horas para determinar el peso seco con una balanza digital con precisión de 0,1 g. Las muestras secas de tallos y ramas, primero se molieron en un molino de martillos utilizando una criba de 1 mm y luego se pasaron a un molino para tejido foliar donde, al igual que las muestras de hojas y ramas secundarias, se molieron y tamizaron. A cada tejido se le realizó el análisis químico para N, P, Ca, Mg, K, Mn, Zn, Cu, S y Fe por digestión húmeda, siguiendo la metodología descrita por Henríquez *et al.* (1995). Con la determinación del porcentaje de humedad de las diferentes secciones, también

Cuadro 1. Principales características de fertilidad y textura de los suelos de las 3 plantaciones de jaúl (*A. acuminata*) en la Cuenca alta del Río Virilla, Costa Rica.

Plantación	Edad	Prof.		pH	Ca	Mg	K	Acidez	CICE	P	Cu	Fe	Mn	Zn	M.O.	
	años	Horiz	cm													Textura
Landelma	2	A1	0 - 5	Franco arenosa	5,7	3,4	1,71	0,25	0,14	5,5	19	16	249	5,1	3,6	4,4
		A2	5 - 15	Arena franca	5,6	1,0	0,30	0,10	0,10	1,5	6	5	63	1,5	2,0	1,8
		A3	15 - 30	Franco arenosa	5,7	2,4	1,04	0,18	0,10	3,7	7	22	96	3,5	2,2	2,8
Vista Mar	4	A1	0 - 15	Franco arenosa	5,5	2,8	0,54	0,12	0,12	3,6	21	11	52	3,1	3,7	2,9
		A2	15 - 30	Franco arenosa	5,6	4,4	0,34	0,10	0,11	5,0	10	13	89	3,2	2,3	1,4
Matinilla	7	A1	0 - 3	Franco arenosa	5,4	3,4	1,69	0,41	0,13	5,6	43	3	265	7,9	13,8	5,1
		A2	3 - 5	Franco arenosa	5,4	2,4	0,85	0,31	0,10	3,6	48	3	355	4,4	9,7	2,4
		A3	5 - 14	Franco arenosa	5,4	1,0	0,23	0,17	0,14	1,6	52	2	191	1,6	3,5	1,5
		A4	14 - 30	Franco arenosa	5,4	1,9	0,52	0,35	0,10	2,9	49	12	214	1,9	5,9	0,9

se calculó la cantidad de biomasa seca de cada una de las fracciones estudiadas.

Se estimó la extracción total de nutrimentos, la cual consiste en multiplicar la concentración de cada elemento por el peso seco (biomasa) de cada tejido del árbol estudiado. Además, se estimó el incremento de la cantidad promedio de nutrimentos absorbidos por año para cada una de las plantaciones evaluadas. Este valor se obtiene a partir de la cantidad total del nutrimento absorbido en cada edad al cual se le resta la cantidad obtenida en el período anterior de evaluación; después se procede a dividir entre el número de años que han transcurrido de una medición a otra.

Se determinó el diámetro promedio de los árboles a la altura del pecho en un área aproximada de 0,3 ha en cada una de las plantaciones

evaluadas. Estos diámetros se relacionaron con la biomasa de los troncos de los árboles a los cuales se les determinó la concentración de nutrimentos con el objeto de establecer una relación entre el diámetro y la concentración de nutrimentos.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza para todos los nutrimentos, para las variables edad, tipo de tejido y su interacción para cada elemento. Además, se realizó una prueba de diferencias mínimas significativas (LSD) de macro y micronutrimentos absorbidos por edad y tejidos, y un análisis de regresión lineal entre los elementos absorbidos, la edad y el diámetro de los árboles.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de la edad de la plantación

La concentración de los nutrimentos estudiados en los diferentes tejidos del árbol de jaúl, varió muy ligeramente con la edad de la plantación y las diferencias entre árboles de edades entre 2 y 7 años no fueron estadísticamente significativas (Cuadro 2). Sin embargo, se observó una tendencia de disminución de Mn ($p=0,036$). El hecho de que no se encontraran diferencias entre plantaciones de 2, 4 y 7 años, no excluye el que se presentaran variaciones en períodos de meses asociadas a cambios fenológicos que ocurren durante el año.

En el Cuadro 2, se incluye los valores de las concentraciones en los diferentes tejidos según la edad de la plantación, resaltando el

hecho de que la concentración de N, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn y B en todas los tejidos tiene poca variación con la edad de la plantación (ausencia de la interacción componente x edad ($p \geq 0,18$)). Esta condición se da cuando los niveles de los diferentes elementos en el suelo logran satisfacer la demanda de los árboles de jaúl.

La tendencia a disminuir de la concentración de Mn con la edad de la plantación no ha sido observada con anterioridad para *A. acuminata* y solo se menciona de un hecho similar en el caso de la concentración de N y P en la especie *A. nepalensis* (Sharma *et al.* 2002).

El análisis de regresión lineal permitió observar que la concentración promedio del Mn sumando los valores parciales encontrados para hojas, ramillas, ramas y tronco, tiende a disminuir en forma lineal ($p=0,054$) con el aumento del diámetro de los árboles. Este fenómeno puede ser

Cuadro 2. Concentración de nutrimentos en diferentes tejidos de la biomasa aérea del jaúl en plantaciones de 2, 4 y 7 años de edad.

Tejido	Edad años	N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
		%						mg kg ⁻¹				
Hojas	2	2,58	0,20	0,56	0,22	0,94	0,150	114	25,0	53	86	19,0
	4	2,64	0,183	0,563	0,14	1,08	0,143	160	21,0	45	61	15,4
	7	2,36	0,216	0,53	0,19	1,04	0,128	136	20,7	54	37	11,4
		2,53a ⁽¹⁾	0,20a	0,55a	0,18a	1,02a	0,14a	137a	22,2a	51b	61a	15,2a
R. Sec	2	0,97	0,142	0,59	0,20	0,62	0,063	50	17,0	73	34	16,6
	4	0,98	0,114	0,663	0,09	0,54	0,039	60	14,3	68	34	12,9
	7	0,88	0,202	0,683	0,16	0,51	0,050	60	14,7	63	17	12,9
		0,94b ⁽¹⁾	0,15b	0,65a	0,15b	0,56b	0,05b	57b	15,3b	68 ^a	28b	14,1a
R. Princ	2	0,65	0,093	0,313	0,10	0,43	0,030	45	11,0	50	22	7,8
	4	0,55	0,067	0,42	0,05	0,37	0,026	52	10,0	33	20	6,4
	7	0,54	0,114	0,273	0,05	0,30	0,029	31	7,0	33	6	6,4
		0,58c ⁽¹⁾	0,09c	0,34b	0,07c	0,37c	0,03c	43b	9,4c	38c	16cb	6,9b
Tallos	2	0,50	0,07	0,29	0,07	0,38	0,020	72	11,0	42	19	6,3
	4	0,32	0,05	0,31	0,03	0,25	0,010	56	8,0	24	11	4,6
	7	0,34	0,08	0,27	0,04	0,26	0,010	59	7,0	30	5	4,3
		0,39d ⁽¹⁾	0,07d	0,29b	0,05d	0,30c	0,01d	62b	8,8c	32c	12c	5,1b

R = Ramas, Sec = Secundarias, Princ. = Principales

¹ Las letras diferentes en una misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$) para cada elemento entre las diferentes fracciones comparadas.

causa de un efecto de dilución de este elemento al aumentar el tamaño de los árboles aunado a la baja concentración del mismo en los suelos de las plantaciones estudiadas. Mills y Jones (1996) mencionan que el ámbito de los niveles críticos de este nutrimento en el tejido foliar es de 130 a 1014 mg kg⁻¹ muy por encima de la concentración foliar encontrada en *A. acuminata* (37-86 mg kg⁻¹).

Efecto del tipo de tejido sobre la concentración de nutrimentos en jaúl

La concentración de todos los elementos varía en función del tipo de tejido comparado, es decir difiere con una probabilidad $p=0,001$ (Cuadro 2). Este comportamiento se debe a que los diferentes tejidos del árbol analizados, tienen funciones diferentes; las hojas y ramas secundarias son tejidos de crecimiento activo, mientras que las ramas y los troncos, tienen concentraciones más bajas pues estos órganos actúan como estructuras de reserva y sostén, acumulando compuestos a base de C (p.e. lignina, celulosa, etc.), entre los cuales se “diluyen” los demás elementos (Mills y Jones 1996).

Las concentraciones de N, P, Mg y S de *A. acuminata* disminuyen en el orden: hojas>ramas secundarias>ramas principales>tallos; un resultado similar encontraron Sharma (1993) y Sharma *et al.* (2002), con la concentración promedio de N y P en las diferentes fracciones de *A. nepalensis*. La concentración de K, Cu y Mn disminuyó en un orden similar al anterior, excepto para ramas principales y tallos, los cuales tenían una concentración similar.

Se considera que los valores en concentración foliar encontrados representan niveles de suficiencia para *A. acuminata*, ya que los árboles escogidos se encontraban en sitios considerados excelentes para el crecimiento de esta especie, según criterios desarrollados por Camacho y Murillo (1986); sin embargo, a nivel foliar, los niveles de Mn y B se consideran bajos y los de Cu altos, en comparación con otras especies del género *Alnus* (Cuadro 3).

La concentración foliar de N en *A. acuminata* fue alta (2,36 a 2,64%), ya que esta especie

se abastece constantemente del elemento a través de la fijación biológica del N₂ con *Frankia* spp. (Hall *et al.* 1979, Russo 1989, 1995, Meza 1994). En ausencia de síntomas de deficiencia visibles y asociados a la carencia de este elemento, se asume que el N fijado permite llenar las necesidades de crecimiento de *A. acuminata*.

La concentración de P en las hojas (0,18–0,22%) se considera suficiente para llenar las necesidades del árbol, debido a que se encuentran dentro del rango de suficiencia (0,10–0,20%) definido para otras especies del género *Alnus* (Cuadro 3). El contenido de P en todas las fracciones en la plantación de 7 años es mayor al observado en las fincas de 2 y 4 años, lo cual puede relacionarse con el mayor contenido de P disponible en los suelos de esta finca (48 v 11-16 mg l⁻¹). Valores similares de concentración foliar mencionan Sharma *et al.* (2002) para *A. nepalensis* de 5 a 40 años de edad, mientras que para plantaciones de la misma especie Sharma (1993) encontró que la concentración de este elemento en todos los tejidos fue menor (0,02–0,10%). En la plantación de 7 años el contenido de P en las hojas y las ramitas es mayor al encontrado en el mismo tipo de tejido en plantaciones de menor edad, debido probablemente a que a esta edad los árboles inician la etapa de floración y como mencionan Sharma *et al.* (2002) para *A. nepalensis*, al aumentar la edad de la plantación, se eleva la concentración de varios nutrimentos en los tejidos de almacenamiento, independientemente de la floración.

La concentración de K en el tejido foliar de *A. acuminata* varía entre 0,94–1,08%. Sharma (1993) encontró una concentración foliar menor para este elemento en *A. nepalensis* (0,59–0,66%), aunque para estas 2 especies la concentración foliar se encuentra dentro de los niveles críticos determinados para otras especies de *Alnus* (0,20–1,16%) (Cuadro 3). La concentración de este elemento en las hojas duplica la concentración de la siguiente sección (ramas secundarias), llenándose a cabalidad con las necesidades de *A. acuminata* sin que ocurra consumo de lujo ya que el contenido de K en este tipo de suelo tiende a ser bajo (Alvarado *et al.* 2001).

Cuadro 3. Concentración de nutrimentos en las hojas de *A. acuminata* y los niveles críticos de nutrimentos para otras especies de *Alnus*.

Nutrimento		Concentración foliar en <i>A. acuminata</i> (<i>Datos propios</i>)	Niveles críticos en otras especies de <i>Alnus</i> (tomado de Mills y Jones 1996, Sharma 1993, Rodríguez <i>et al.</i> 1984)
N	%	2,36-2,64	1,92-3,84
P	%	0,18-0,22	0,08-0,36
Ca	%	0,53-0,56	0,16-2,0
Mg	%	0,14-0,22	0,10-0,37
K	%	0,94-1,08	0,20-1,16
S	%	0,13-0,15	0,15-0,18
Fe	mg kg ⁻¹	114-160	48-404
Zn	mg kg ⁻¹	45-54	12-53
Mn	mg kg ⁻¹	37-86	130-1014
Cu	mg kg ⁻¹	21-25	3-10
B	mg kg ⁻¹	11-19	21-44

El B y el Ca tienen una mayor concentración en las hojas y ramas secundarias, entre las cuales no hay diferencias, mientras que se encontraron en menor cantidad en las ramas principales y los tallos; en las ramas secundarias, se notó un ligero incremento del contenido de Ca con respecto a las hojas. La mayor concentración de Ca en los tejidos más jóvenes refleja la necesidad del elemento para la formación de tejido nuevo, mientras que en el tejido viejo la menor concentración de Ca se da como resultado de un efecto de dilución por acumulación de grandes cantidades de otros componentes en la madera. El contenido porcentual de Ca (0,53–0,56%) en tejido foliar de *A. acuminata* se considera adecuado para llenar las necesidades del árbol pues se encuentra dentro de los niveles críticos establecidos para otras especies de *Alnus* (0,29–2,00%) definidos por Mills y Jones (1996). A pesar de que los contenidos de Ca disponible en el suelo son bajos, los contenidos en los diferentes tejidos alcanzan el nivel de suficiencia definido para la mayoría de las especies agrícolas (Bertsch 2003).

Los contenidos foliares de Mg (0,14–0,22%) y S (0,13–0,15%) se consideran suficientes para llenar las necesidades nutricionales de los árboles de jaúl, debido a que no se observó

síntomas de deficiencia foliar de los elementos y a que estas cantidades se encuentran dentro de los niveles críticos foliares para otras especies de *Alnus* (Cuadro 3).

Indiferentemente del tejido estudiado y de la edad de la plantación, la concentración porcentual de los macronutrimentos en jaúl, descendió en el orden: N (0,32-2,64)>K (0,25-1,08)>Ca (0,27-0,68)>P (0,05-0,22)≈Mg (0,03-0,22)>S (0,01-0,15) (Cuadro 2). Sharma (1993) encontró que para *A. nepalensis* se da la misma secuencia (N>K>Ca>P), tendencia común a muchas otras especies, aunque no en todas, y que puede depender de la cantidad disponible de los elementos en diferentes ambientes.

La concentración de Zn fue mayor en las ramas secundarias que en las hojas y disminuyó en el orden de ramas secundarias>hojas>ramas principales>tallo. Mills y Jones (1996) mencionan que la actividad de la enzima anhidrasa carbónica es altamente dependiente del Zn y estas reacciones se dan principalmente en zonas meristemáticas, por lo tanto es de esperar que este micronutriente se encuentre en mayor concentración en un tejido cercano a los ápices de crecimiento.

El contenido de Fe en las hojas fue mayor que en las otras secciones comparadas de la

biomasa aérea del árbol, entre las cuales no hubo diferencia (Cuadro 2). Esto se debe a que el Fe es indispensable en el tejido foliar como componente importante en los sistemas enzimáticos; también es importante en la asimilación de N_2 y producción de energía (NADP) y se le atribuyen funciones indirectas como la producción de clorofila y el crecimiento de meristemos de raíces y tejido foliar (Mills y Jones 1996).

El contenido foliar de Fe y Zn ($mg\ kg^{-1}$) se considera como suficiente para llenar las necesidades de los árboles en estudio, ya que se encuentra dentro del rango de niveles críticos que se obtuvieron en otras especies de *Alnus* (Cuadro 3). Whitbread (1997) menciona que los aumentos de los contenidos de Zn en el sustrato y en el tejido foliar ($61,5\ \mu g\ g^{-1}$, $p < 0,001$), no provocaron efectos desfavorables en *A. glutinosa*.

La concentración foliar de Cu se consideró alta comparada con los niveles críticos de este micronutriente encontrado en otras especies de *Alnus* (Cuadro 3). Villavicencio (1977) menciona que los Andisoles comparados con otros órdenes de suelos tienen los contenidos más bajos de Cu y estos aumentaron con el grado evolutivo de los suelos. Esto hace suponer que el requerimiento de Cu es alto para la especie *A. acuminata* y lo toma del suelo aunque el mismo posea bajas concentraciones de este nutriente.

Los contenidos de B foliar son ligeramente bajos (Cuadro 2), para llenar las necesidades de *A. acuminata*; este elemento se considera normalmente bajo para la producción de cultivos agrícolas en suelos similares de Costa Rica (Bornemisza 1992, Martini 1970, Oficina del Café 1982) y también para la producción de coníferas y eucaliptos en Colombia y Chile (Stone 1990).

El contenido de Mn foliar en las plantaciones estudiadas varió entre 37-86 $mg\ kg^{-1}$, valores considerados bajos para el género *Alnus* (Cuadro 3). En las plantaciones también se encontró que los niveles de Mn en el suelo son bajos (Cuadro 1), lo cual también puede considerarse normal para este tipo de suelos en Costa Rica (Bornemisza 1992, Alvarado *et al.* 2001).

Los contenidos de los micronutrientes, en $mg\ kg^{-1}$, descienden en el orden: Fe (31-

160)>Zn (24-73)>Mn (5-86)>Cu (7-25)>B (4-19), indiferentemente del tipo de tejido o de la edad de la plantación (Cuadro 2).

Extracción de nutrimentos en los diferentes tejidos de *A. acuminata*

La extracción total de nutrimentos es el resultado de multiplicar la concentración de cada elemento por la masa seca (biomasa) de cada tejido del árbol estudiada. Aunque la concentración se mantenga "constante", la cantidad extraída de nutrimentos depende de la cantidad de biomasa, la cual se acumula en forma diferente entre los tejidos de los árboles y depende de la edad de la plantación.

De los tejidos estudiados hasta los 2 años de edad, la copa y los tallos tienen biomásas comparables ($1,7$ y $1,2\ t\ ha^{-1}$, respectivamente); es a partir del cuarto año que los tallos conforman la mayor parte de la biomasa aérea y por ende de los nutrimentos absorbidos ($9,8\ t\ ha^{-1}$), seguido por las ramas principales ($1,9\ t\ ha^{-1}$), las hojas ($1,3\ t\ ha^{-1}$) y las ramas secundarias ($1\ t\ ha^{-1}$) (Cuadro 4).

En la plantación de 2 años la mayor extracción de nutrimentos se dio en las hojas; en esta etapa del desarrollo fenológico del árbol se requiere un desarrollo más vigoroso del área foliar debido a la producción de fotosintatos necesarios para el crecimiento del árbol y la formación de tejidos. En las evaluaciones posteriores (4 y 7 años), el tejido que extrae mayor cantidad de N, Mg, K, S, Fe, Cu y Mn es el tallo, seguido por las hojas; mientras que para el P, Ca y Zn el segundo tejido en extraer estos elementos varió con la edad de la plantación. A estas edades el árbol aún se encuentra en pleno crecimiento, debido a que todavía no ha alcanzado la mitad de la edad del ciclo de corta y la biomasa del tallo está en pleno desarrollo y por lo tanto recibe la mayor cantidad de los nutrimentos que se extraen por las raíces, además de los fotoasimilados que generan las hojas (Cuadro 4).

La extracción total de macronutrientes en las plantaciones de *A. acuminata* se dio en el orden de $N > K > Ca > P > Mg > S$ y con los

Cuadro 4. Extracción de los nutrimentos por diferentes tejidos del jaúl (*A. acuminata*) en plantaciones de diferente edad.

Tejido	Edad	Peso seco	N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
	años												
Hojas	2	848	21,9	1,7	4,8	1,9	8,0	1,3	96,4	21,2	44,9	72,6	16,0
	4	1325	34,9	2,4	7,5	1,9	14,4	1,9	211,6	27,8	59,6	81,3	20,4
	7	2538	59,9	5,5	13,4	4,7	26,5	3,2	346,0	52,4	137,9	93,9	29,0
R. Sec.	2	312	3,0	0,4	1,8	0,6	1,9	0,2	15,6	5,3	22,7	10,5	5,2
	4	959	9,4	1,1	6,4	0,9	5,1	0,4	57,9	13,7	65,5	32,3	12,4
	7	2261	19,8	4,6	15,5	3,5	11,6	1,1	134,9	33,2	143,2	38,4	29,2
R. Princ.	2	574	3,7	0,5	1,8	0,6	2,5	0,2	25,8	6,3	28,5	12,6	4,5
	4	1889	10,5	1,3	7,9	1,0	7,0	0,5	98,9	18,9	61,7	38,4	12,2
	7	5451	29,6	6,2	14,9	2,9	16,5	1,6	169,0	40,0	178,1	32,7	34,9
Tallos	2	1136	5,7	0,8	3,3	0,8	4,4	0,2	81,4	12,5	48,1	22,0	7,2
	4	9806	31,4	4,8	30,7	2,6	24,8	1,1	549,1	78,4	235,3	104,6	45,1
	7	56187	191,0	44	149,8	21	146,1	7,1	3315,0	412,0	1666,9	299,7	243,5
Total	2	2870	34,3	3,5	11,7	3,9	16,7	1,9	219,2	45,3	144,2	117,7	32,8
	4	13979	86,1	9,6	52,5	6,4	51,3	3,9	917,4	138,9	422,2	256,6	90,0
	7	66437	300,3	60,6	193,6	31,8	200,7	13,1	3964,9	537,6	2126,0	464,7	336,5

R = Ramas, Sec. = Secundarias, Princ. = Principales

Densidad de plantación = 816 árboles ha⁻¹

micronutrimentos de Fe>Zn>Mn>Cu>B, lo que se considera normal para la mayoría de cultivos agrícolas (Bertsch 2003).

En el cuadro 5 se observa que para la mayoría de los nutrimentos, ocurre un aumento de la cantidad total absorbida con la edad de las plantaciones; sin embargo, se dio una disminución de la extracción de Mg del segundo al cuarto año y el Mn varió poco entre las edades comparadas.

Los nutrimentos absorbidos y acumulados en cualquier tejido del árbol pueden ser reincorporados al sistema como residuos o por lavado de la lluvia. Sin embargo, la cantidad de nutrimentos

absorbidos y acumulados en el tallo al momento de la corta final, deberán ser devueltos al sistema mediante aplicaciones y deberá aplicarse una cantidad mayor para contemplar pérdidas y retención de estos nutrimentos en el sistema suelo. Los nutrimentos asociados a la biomasa aérea que se mencionan en el cuadro 6, serían los que, en el caso de raleos de la plantación, se incorporarían al sistema una vez que los residuos se descompongan.

La extracción relativa de los nutrimentos por las hojas y ramas del jaúl con respecto al total absorbido por la biomasa aérea disminuyó

Cuadro 5. Incremento de la cantidad de nutrimentos absorbidos (promedio anual) por árboles de jaúl de diferente edad.

Edad	Biomasa	N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
2	1434,8	17,2	1,7	5,9	2,0	8,4	0,9	110	23	72	59	16
4	5554,8	25,9	3,0	20,4	1,3	17,3	1,0	349	47	139	69	29
7	17485,9	79,0	17,0	47,0	8,5	49,8	3,1	1016	133	568	69	82

Cuadro 6. Extracción de nutrimentos con respecto al total absorbido por las fracciones del jaúl (*A. acuminata*) en plantaciones de diferente edad.

Tejido	Edad	Peso seco	N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
	años		%										
Hojas	2	30	63,8	48,8	40,7	47,6	47,6	68,9	44,0	46,8	31,2	61,7	48,7
	4	9	40,6	25,4	14,2	29,6	28,0	49,1	23,1	20,0	14,1	31,7	22,6
	7	4	19,9	9,0	6,9	14,9	13,2	24,8	8,7	9,8	6,5	20,2	8,6
R. Sec.	2	11	8,8	12,8	15,7	15,9	11,6	10,4	7,1	11,7	15,7	8,9	15,8
	4	7	10,9	11,4	12,1	13,9	10,0	9,6	6,3	9,9	15,5	12,6	13,8
	7	3	6,6	7,6	8,0	11,1	5,8	8,7	3,4	6,2	6,7	8,3	8,7
R. Princ.	2	20	10,8	15,4	15,3	15,2	14,8	9,3	11,8	13,9	19,8	10,7	13,6
	4	14	12,1	13,2	15,1	15,7	13,6	12,5	10,8	13,6	14,6	15,0	13,5
	7	8	9,9	10,3	7,7	9,1	8,2	12,2	4,3	7,4	8,4	7,0	10,4
Tallos	2	40	16,6	23,0	28,4	21,3	26,0	11,5	37,1	27,6	33,3	18,7	22,0
	4	70	36,4	49,9	58,5	40,8	48,4	28,7	59,9	56,5	55,7	40,8	50,1
	7	85	63,6	73,1	77,4	64,8	72,8	54,3	83,6	76,6	78,4	64,5	72,3

R = Ramas, Sec. = Secundarias, Princ. = Principales. Densidad de plantación = 816 árboles ha⁻¹

(efecto de la biomasa de cada tejido) al aumentar la edad de la plantación, mientras que los tallos mostraron un comportamiento contrario. En las hojas se estimó a los 2 años una extracción relativa de nutrimentos entre 31 y 69%, la cual disminuyó a los 7 años (6-25%). En ramas secundarias y primarias se observó una disminución de la extracción relativa de todos los nutrimentos, especialmente entre las plantaciones de 4 y 7 años de edad. En los tallos se observó una extracción de nutrimentos entre 11 y 37% a los 2 años y se dio un aumento entre 54 y 78% en la plantación de 7 años (Cuadro 6). Este hecho refleja un mayor requerimiento de nutrimentos por la copa del árbol en edades tempranas y en tallos en edades posteriores.

Lo anterior está inversamente relacionado con el crecimiento que experimentó la biomasa de cada una de las fracciones con respecto al crecimiento total de los árboles. La biomasa de las hojas, ramas secundarias y primarias disminuyó con respecto al crecimiento total de la biomasa aérea al aumentar la edad de la plantación, mientras que los tallos experimentaron un crecimiento paralelo al que se dio en la biomasa total.

Al respecto Poggiani *et al.* (1979) mencionan que en la fase inicial de crecimiento de los árboles, el peso seco del fuste y de la copa es equivalente; sin embargo conforme los árboles van creciendo los pesos de los fustes aumentan en forma exponencial, mientras que la biomasa de la copa se mantiene aproximadamente igual.

CONCLUSIONES

La concentración de los nutrimentos estudiados no varía entre árboles de jaúl con edades entre los 2, 4 y 7 años, excepto el Mn, el cual tiende a disminuir con la edad y con el aumento del diámetro de los árboles de jaúl.

La concentración de nutrimentos en los tejidos estudiados fue mayor en las hojas, excepto para B y Ca, los cuales poseen una concentración similar en hojas y ramas secundarias y el Zn elemento que fue mayor en las ramas secundarias.

La concentración de todos los elementos varía en función del tipo de tejido comparada. Se considera que los valores de concentración encontrados representan niveles de suficiencia

para *A. acuminata*, ya que los árboles escogidos se encuentran en sitios excelentes para el crecimiento de esta especie.

La cantidad extraída de nutrimentos depende de la cantidad de biomasa, la cual se acumula en forma diferente entre las fracciones de los árboles y depende de la edad de la plantación. La extracción total de nutrimentos en las plantaciones de *A. acuminata* se dio en el orden de N>K>Ca>P>Mg>S y de Fe>Zn>Mn>Cu>B.

Es importante realizar este tipo de estudios en plantaciones de *A. acuminata* de mayor edad hasta el momento de la cosecha y en otras plantaciones forestales de interés.

AGRADECIMIENTOS

A la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL) por el financiamiento de esta investigación. Al personal del vivero del departamento de Recursos Naturales de la CNFL por su colaboración en el muestreo de las plantaciones. Al Laboratorio de Suelos y de Recursos Naturales del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica por su colaboración en el procesamiento y análisis de las muestras y a todas las personas que de una u otra forma colaboraron para la realización de esta investigación.

LITERATURA CITADA

- ALVARADO A., BERTSCH F., BORNEMISZA E., CABALCETA G., FORSYTHE W., HENRÍQUEZ C., MATA R., MOLINA E., SALAS R. 2001. Suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) de Costa Rica. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo, San José, Costa Rica. 111 p.
- BERTSCH F. 2003. Extracción de nutrimentos por los cultivos. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo, San José, Costa Rica. 307 p.
- BORNEMISZA E. 1992. Los oligoelementos, su química y manejo en Andisoles. Suelos Ecuatoriales 22(1): 25-32.
- BUDOWSKI G., RUSSO R. 1997. Nitrogen fixing trees and nitrogen fixation in sustainable agriculture: Research challenges. *Soil Biol. Biochem.* 29(5/6): 767-770.
- CAMACHO P., MURILLO O. 1986. Algunos resultados preliminares de la epidometría del jaúl *Alnus acuminata* (H.B.K.) O. Kundze. Departamento de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. p.i.
- CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 1984. Especies para leña: Arbustos y árboles para la producción de energía. Trad. VA de Fernández. Turrialba, Costa Rica. p. 126-127.
- CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 1986. Silvicultura de especies promisorias para la producción de leña en América Central. Turrialba, Costa Rica. Informe Técnico No. 86. p. 49-53.
- CERVANTES E., RODRÍGUEZ C. 1992. Relationships between the mycorrhizal and actinorhizal symbioses in non-legumes. *Methods in Microbiology* 24: 417-431.
- GORDON J.C., DAWSON J.O. 1979. Potential uses of nitrogen fixing trees and shrubs in commercial forestry. *Bot. Gaz.* 140(Suppl.): S88-S90.
- HALL R.B., NABB J.R. H.S., MAYNARD C.A., GREEN T.L. 1979. Toward development of optimal *Alnus glutinosa* symbioses. *Bot.Gaz.* 140(Suppl.): S120-S126.
- HENRÍQUEZ C., BERTSCH F., SALAS R. 1995. Fertilidad de suelos: Manual de laboratorio. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo, San José, Costa Rica. 64 p.
- MARTINI J.A. 1970. Caracterización del estado nutricional de los principales Andosoles de Costa Rica, mediante la técnica del elemento faltante en el invernadero. *Turrialba* 20(1): 72-84.
- MEZA E. 1994. Efecto de condiciones climáticas y edáficas sobre la interacción entre el actinomicete *Frankia* sp. y el jaúl (*Alnus acuminata*). Tesis Ing. Agr. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 198 p.
- MONTOYA A. 1999. Plan de reforestación para la plantación de Dorval S.A. FUNDECOR, San José, Costa Rica. 233 p.
- MILLS H.A., JONES J.B. 1996. Plant analysis handbook II. MicroMacro Publishing, Athens, Georgia, USA. 180 p.

- OFICINA DEL CAFÉ. 1982. Informe anual de labores 1981. Programa cooperativo Oficina del Café-MAG. San José, Costa Rica. 87 p.
- POGGIANI F., COUTO H.T.Z., SIMÕES J.W. 1979. Aspectos ecológicos dos “mini-rotações” e do aproveitamento dos resíduos florestais. Piracicaba, Brasil. Circular técnica IPEF (74): 1-7.
- RODRÍGUEZ C., MIGUEL C., SUBRAMANIAM P. 1984. Seasonal fluctuations of the mineral concentration of alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) from the field. *Plant and Soil* 78: 201-208.
- RUSSO R.O. 1989. Evaluating alder endophyte (*Alnus acuminata*-*Frankia*-Mycorrhizae) interactions. *Plant and Soil* 118: 151-155.
- RUSSO R.O. 1990. Evaluating *Alnus acuminata* as a component in agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 10: 241-252.
- RUSSO R.O. 1995. *Alnus acuminata* ssp. *arguta*, a valuable resource for neotropical highlands. In: D.O. Evans, L.T. Szott (eds). Nitrogen fixing trees for acid soil. Winrock, Arkansas, USA. p. 156-163.
- SHARMA E. 1993. Nutrients dynamics in Himalayan alder plantations. *Annals of Botany* 72: 329-336.
- SHARMA G., SHARMA R., SHARMA E., SINGH K.K. 2002. Performance of series of *Alnus*-cardamom plantations in the Sikkim Himalaya: Nutrient dynamics. *Annals of Botany* 89: 273-282.
- STONE E.L. 1990. Boron deficiency and excess in forest trees: A review. *Forest Ecology and Management* 37: 49-75.
- VILLAVICENCIO N.J. 1977. Determinación de Cu, Zn y Mn en capas superficiales de Entisoles, Inceptisoles y Ultisoles de Costa Rica. Tesis Ing. Agr, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 80 p.
- WHITBREAD P.H. 1997. The potential of some soil amendments to improve tree growth on metalliferous mine wastes. *Plant and Soil* 192: 199-217.