

## **PATRONES DE LLUVIA, TRANSCOLACIÓN Y FLUJO DE NUTRIENTES EN LAS CUENCAS DE BISLEY, BOSQUE EXPERIMENTAL DE LUQUILLO, PUERTO RICO**

*Tamara Heartsill Scalley, Carlos R. Estrada Ruiz y Samuel Moya*

Instituto Internacional de Dasonomía Tropical

Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América

1201 Calle Ceiba, Jardín Botánico Sur, Río Piedras, Puerto Rico 00926-1119

### **RESUMEN**

Describimos la cantidad de lluvia y transcolación durante veinte años (1988-2008), incluyendo varios periodos de sequías, huracanes y lluvias intensas. La composición de nutrientes en la lluvia y transcolación fueron medidos semanalmente durante quince años (1988-2002), incluyendo los periodos de huracanes y sequías. Las entradas anuales de K, Ca, Mg, Cl, Na y  $\text{SO}_4$ -S fueron similares a las presentadas para otros bosques tropicales influenciados por la brisa marina. La cantidad de nitrógeno que llega con la lluvia es comparativamente baja y refleja el aislamiento relativo de zonas urbanas del aire y de los vientos de origen marino que llegan al área de estudio. La lluvia y transcolación anual promedio para estos veinte años fue de 3668 y 2168 mm/año respectivamente. El pH de la lluvia disminuyó durante el periodo de estudio. Los nutrientes traídos por la lluvia tuvieron mayores diferencias mensuales, comparados con los nutrientes en la transcolación donde menos nutrientes tenían diferencias mensuales. El proceso de la lluvia al pasar por el dosel resulta en que el agua de la transcolación sea enriquecida con ciertos nutrientes. En particular, las tasas semanales de enriquecimiento fueron menos de 1 para las sales marinas y el carbono orgánico disuelto y entre 1 y 2 para el Mg, Ca,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{SO}_4$ -S. En cambio, las tasas de enriquecimiento eran mayor de 10 para  $\text{NH}_4$ -N,  $\text{PO}_4$ -P y K y lo cual refleja enriquecimiento por acción biológica en el dosel de los árboles en el bosque. Estas observaciones a largo plazo indican que los procesos físicos y biológicos asociados al proceso del paso de agua de lluvia por el dosel, son capaces de amortiguar los ciclos de nutrientes internos del bosque de las variaciones inter-anales y mensuales de la lluvia. Las sequías y la erupción de volcanes en la región del Caribe se pueden detectar en las entradas de nutrientes al bosque en este periodo de estudio. Durante los años de este estudio han ocurrido varios periodos de sequías y de lluvias intensas, y depende de la cantidad de años considerados, las conclusiones sobre los patrones de lluvia anual promedio pueden ser distintas. Sin embargo, se observa un patrón consistente de reducción, aunque muy pequeña, en la transcolación bajo el dosel y un aumento en la acidez de la lluvia.

### **INTRODUCCIÓN**

Una de las predicciones sobre el cambio climático global, hecha por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés, <http://www.ipcc.ch/languages/spanish.htm>) es que aumentarán los patrones

erráticos en las lluvias mundialmente. Con la colección de datos del Bosque Experimental de Luquillo por los últimos veinte años podemos comenzar a explorar si han cambiado, y de ser así, como han cambiado los patrones de lluvia locales en este bosque. Al describir los patrones de la lluvia y de la lluvia que pasa por el dosel (llamada

transcolación), pondremos en una perspectiva un poco más amplia los eventos actuales de lluvia observados y consideraremos como pueden variar nuestras conclusiones sobre los patrones observados durante un periodo de 20 años de estudio.

La lluvia en Puerto Rico está influenciada por factores que incluyen la topografía, la convección, las ondas alisias del Este, las vaguadas y las tormentas o huracanes (Picó 1969, Colón 1987, Lugo y García Martínó 1996). La lluvia orográfica, aquella que ocurre por la topografía, es la que predomina en la Sierra de Luquillo, en particular en la zona de El Yunque. Los vientos que vienen del Atlántico cargado de la humedad del océano, al encontrarse con la topografía o relieve de las montañas, ascienden y se enfrían. Al enfriarse los vientos, éstos pierden su capacidad para almacenar humedad y se precipita su contenido de humedad produciendo lluvia. Este tipo de lluvia es llamada lluvia orográfica, por estar relacionada a la topografía o relieve de las montañas. En la lluvia orográfica las nubes están cerca de la montaña, a relativamente baja elevación con lluvia de gotas pequeñas regularmente (Picó 1969). Otro tipo de lluvia en Puerto Rico es la lluvia por convección, común en el área suroeste de la Isla. Esta lluvia por convección se produce bajo condiciones de humedad y calor intenso. El calor afecta directamente al aire húmedo que está cerca de la superficie de la tierra y en las horas de mayor insolación este aire húmedo y caliente asciende a la atmósfera. Este aire contiene la humedad del agua que se ha evaporado en la superficie calentada y al ascender se enfría y forma nubes las cuales pueden producir aguaceros intensos. En la lluvia por convección, las nubes con el aire húmedo están a una elevación muy alta en la atmósfera y al ir cayendo las gotas, éstas van acumulando agua de otras gotas por lo que al llegar a la superficie de la tierra han formado gotas grandes, produciendo aguaceros intensos, dispersos y de corta duración (Picó 1969).

La mayoría de los eventos de lluvia en Puerto Rico son producidos por las ondas alisias, (también llamadas ondas tropicales) y las vaguadas (Colón 1987). Las ondas vienen del Este con aire del océano

Atlántico y producen lluvias de larga duración que pueden cubrir una extensión muy amplia del terreno. Las vaguadas son sistemas que están ubicados en las partes superiores de la atmósfera y producen lluvias muy similares a las de las ondas. Otros sistemas que traen lluvias lo son las tormentas y huracanes, que contienen grandes masas de aire cargado de humedad y viento. Aunque pueden traer lluvias muy intensas y ráfagas fuertes de vientos; en Puerto Rico ni los huracanes ni las tormentas son los eventos que más lluvia traen, pues no son eventos tan comunes como lo son los otros tipos de lluvias mencionados. Las ondas, las vaguadas y las lluvias orográficas en el noreste, son los eventos que traen la mayor cantidad de precipitación a la Isla.

Además de agua, aunque en menor cantidad, estas lluvias contienen sales marinas y otros elementos (e.g. nitrógeno, potasio) que sirven como fuente de nutrientes. Los nutrientes en la lluvia y la transcolación, la deposición del polvo y de los aerosoles marinos pueden ser fuentes importantes de entradas de nutrientes en los bosques tropicales (Proctor 2005). Existen varios estudios basados en bosques tropicales que describen los flujos de nutrientes anuales asociados a la lluvia y/o a la transcolación (McDowell *et al.* 1990; Bruijnzeel, 1989; Veneklaas 1990; Burghouts *et al.* 1998; Brouwer 1996; Cavelier *et al.* 1997; Eklund *et al.* 1997; McDowell 1998; Waterloo *et al.* 1999; MacDonald y Healy 2000; Loescher *et al.* 2002; Hölscher *et al.* 2003; Liu *et al.* 2003). Los estudios que cubren periodos de más de diez años, o los que incluyen tanto nutrientes en la lluvia como en la transcolación y eventos atmosféricos como huracanes y sequías son sin embargo muy pocos (Heartsill Scalley *et al.* 2007). En este artículo, describimos y cuantificamos el flujo de nutrientes asociado a la lluvia y a la transcolación en un bosque secundario muy húmedo de montaña en Luquillo, Puerto Rico. Este artículo se divide en tres partes generales, en la primera parte describimos los patrones de lluvia y transcolación por veinte años, del 1988 al 2008, en las cuencas de Bisley, Bosque Experimental de Luquillo, y comparamos la cantidad y el patrón de la lluvia con la de la estación de campo El Verde, un bosque similar al oeste de El Yunque. En la segunda

parte de este artículo, describimos las cantidades y los patrones de los nutrientes principales de la lluvia y la transcolación para los años 1988 al 2002, y en la tercera parte, relacionamos los patrones en los flujos de nutrientes con eventos atmosféricos locales tales como huracanes, sequías, polvo del Sahara y erupciones del volcán Soufrière en la vecina isla de Montserrat.

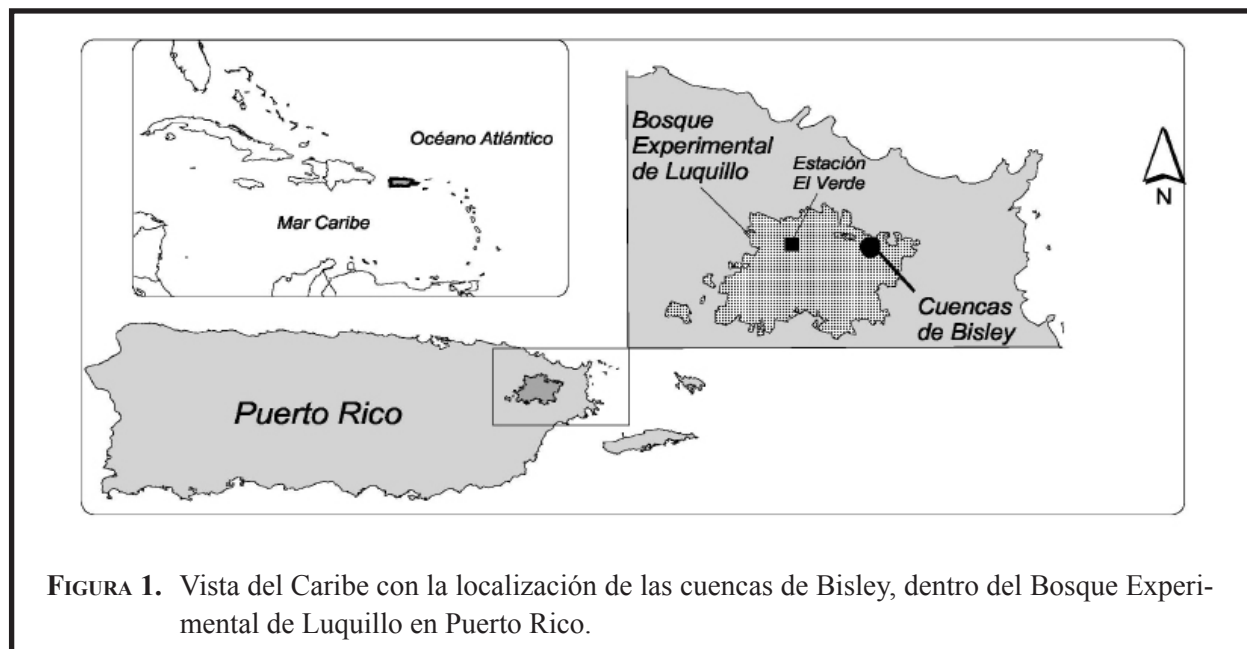
## MÉTODOS

### *Descripción del área de estudio*

Este estudio fue llevado a cabo en las cuencas experimentales de Bisley, Bosque Experimental de Luquillo al noroeste de Puerto Rico ( $18^{\circ} 20' \text{N}$   $65^{\circ} 50' \text{W}$ ). El bosque y las cuencas han sido descritos detalladamente por Scatena (1989). Las cuencas se extienden en elevación de 265 a 456 m sobre nivel del mar y son cubiertas por bosques muy húmedos, bosques de tabonuco (*Dacryodes excelsa*) secundario maduro. El lugar de estudio está situado a 12 kilómetros al este de la estación de campo de El Verde, en Río Grande (Figura 1). Ambos sitios están en el lado de barlovento de la isla de Puerto Rico, a elevaciones similares y cubiertos con el mismo tipo de bosque.

Una diferencia entre El Verde y Bisley es que el área de estudio de Bisley se expone directamente a los vientos alisios del noreste y tiene un clima tropical marítimo (Schellekens *et al.* 1999). En Bisley, la lluvia y escorrentías superficiales ocurren en todos los meses del año. Las lluvias de convección, los vientos alisios del noreste, el polvo del Sahara, los frentes fríos de invierno, las ondas alisias o tropicales, las depresiones y los huracanes, todos influyen a este bosque (Odum y Pigeon 1970; Prospero y Nees 1986; Scatena 1989; Larsen 2000). Los eventos de lluvia son generalmente pequeños y de baja intensidad, y otras pequeñas, pero muy frecuentes durante la mayor parte del año, producto de las lluvias orográficas, (Schellekens *et al.* 1999).

La transcolación de este bosque y otros bosques tropicales se ha estudiado anteriormente, (Odum y Pigeon 1970; Clements y Colón 1975; Scatena 1990; Schellekens *et al.* 1999; Schellekens *et al.* 2000; Holwerda *et al.* 2006, Heartsill Scalley *et al.* 2007), pero nunca por un periodo tan largo como el de este estudio (20 años). La interceptación de lluvia por el dosel en Bisley es relativamente alta (cerca de 40 por ciento) y por lo tanto la transcolación está entre las más bajas registradas para los bosques tropicales



**FIGURA 1.** Vista del Caribe con la localización de las cuencas de Bisley, dentro del Bosque Experimental de Luquillo en Puerto Rico.

de tierras bajas (Bruijnzeel 1989). Sin embargo, cabe señalar que los valores de interceptación en Bisley son similares a esos medidos en otros bosques tropicales marítimos y confirman la noción de que la interceptación de la lluvia es relativamente alta en los bosques tropicales que reciben más de 3000 mm/año de lluvia y que están situados en los bordes continentales o en islas (Schellekens *et al.* 1999). Los altos valores de interceptación anual relativa y evaporación en Bisley se atribuyen a la gran frecuencia de lluvias de corta duración y de baja intensidad y a la relativamente baja resistencia aerodinámica del dosel (Scatena 1990; Schellekens *et al.* 2000).

Durante el período del estudio, el bosque fue influenciado por una serie de huracanes y de sequías (Figura. 2). El huracán Hugo, el 18 de septiembre de 1989, es el primer y más grande huracán en nuestro periodo de estudio y el más grande que afectara el área en los últimos 70 años (Scatena y Larsen 1991). El huracán desfolió el área entera, redujo cerca del 50 por ciento de la biomasa sobre el terreno y derribó la torre para acceder al dosel usada para las medidas meteorológicas. Sin embargo, las medidas semanales de transcolación no fueron interrumpidas, la torre meteorológica fue reestablecida después de algunos meses y en el plazo de un año tanto los ciclos hidrológicos como las exportaciones y flujos de nutrientes alcanzaron los niveles de antes del huracán (Scatena *et al.* 1996; Schaefer *et al.* 2000).

Durante el período del estudio Bisley también fue afectado por los huracanes Bertha (6 de julio de 1996), Hortense (10 de septiembre de 1996), Marilyn (15 de septiembre de 1996) y Georges (22 de septiembre de 1998). De estos, Georges fue el más intenso defoliando el dosel y derrivando árboles (Ostertag *et al.* 2003). Aunque Bertha, Hortense y Marilyn ocurrieron durante el mismo año y trajeron mucha lluvia, éstos pasaron bastante lejos y solo causaron daños menores al dosel y aumentos relativamente pequeños en la caída de hojas. La lluvia y la transcolación fueron medidos durante todas estos fenómenos meteorológicos.

Varios eventos de sequía, también ocurrieron durante el período de estudio. Como otras sequías en Puerto Rico (Larsen 2000; Covich *et al.* 2003), la

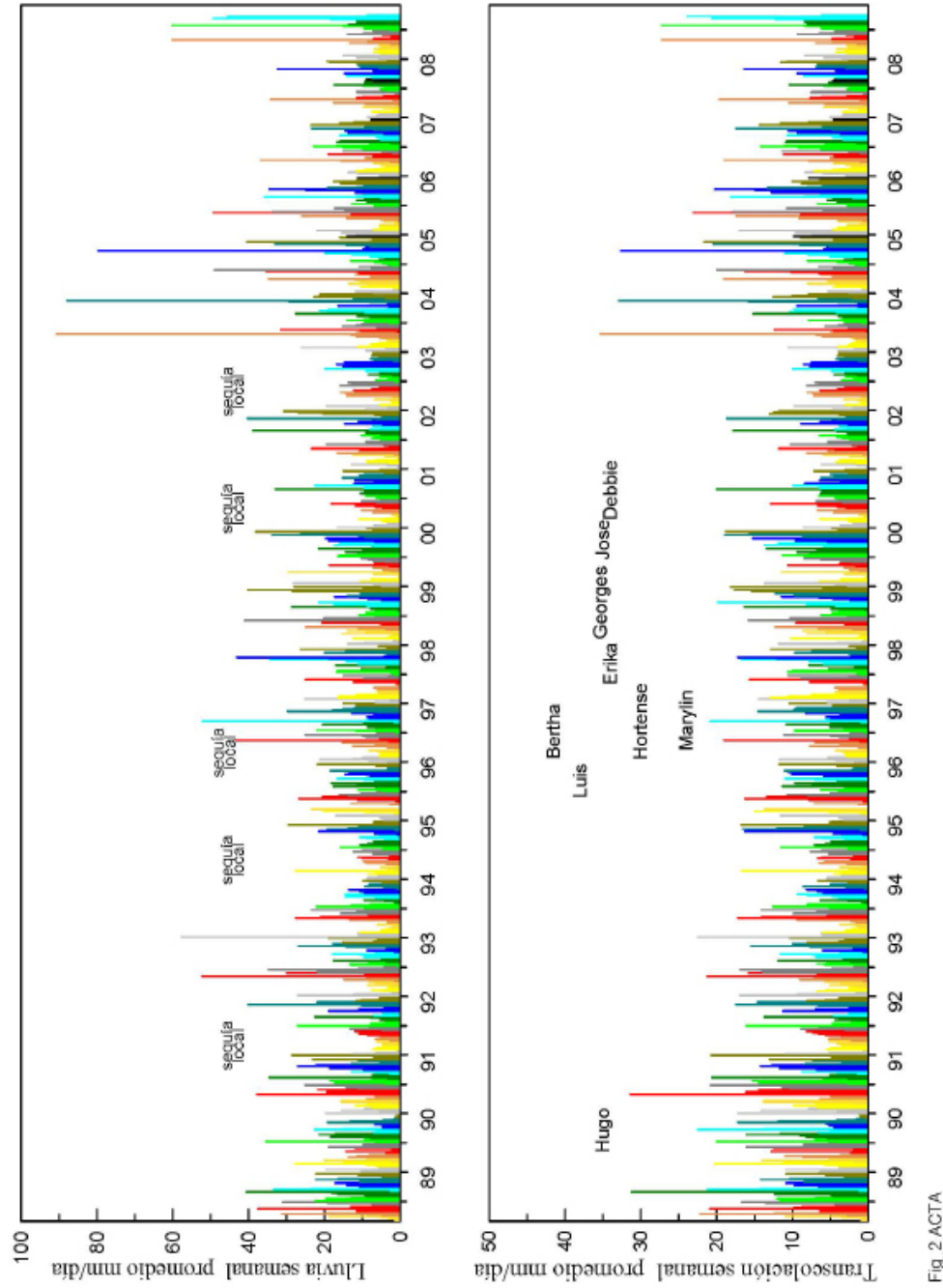
intensidad y los efectos de estos períodos de sequía fueron muy variables en todo Puerto Rico. Las sequías regionales más fuertes fueron observadas después del huracán Hugo y en 1991, 1994 y 1996. Eventos mayores de sequías locales fueron observadas en el área del estudio en 2000 y 2002.

### *Colección de lluvia y transcolación*

La lluvia y transcolación en este estudio fueron recogidas y medidas con el mismo método durante todo el periodo de estudio y de acuerdo con nuestras publicaciones anteriores (Scatena 1990; Schellekens *et al.* 1999; Holwerda 2006, Heartsill Scalley *et al.* 2007). La lluvia y la transcolación en la primera parte del artículo incluyen desde marzo 1988 a septiembre 2008. Los datos fueron recogidos semanalmente (todos los martes por la mañana) y después de algunos eventos importantes de precipitación. La lluvia total fue medida y recogida en un envase ubicado en una torre de 25 m de alto (a nivel del dosel del bosque) situada a una elevación de 361 m sobre nivel del mar (Figura 3). La transcolación fue medida usando 30 envases colocados aleatoriamente bajo el dosel del bosque (Figura 4). El colector de lluvia en la torre y cada colector de transcolación tenían embudos idénticos de 186° cm diámetro. Los protocolos y los datos originales están disponibles en la página de Luquillo LTER el set de datos #26. <http://luq.lternet.edu/data/lterdb26/metadata/lterdb26.htm>.

### *Química de lluvia y transcolación*

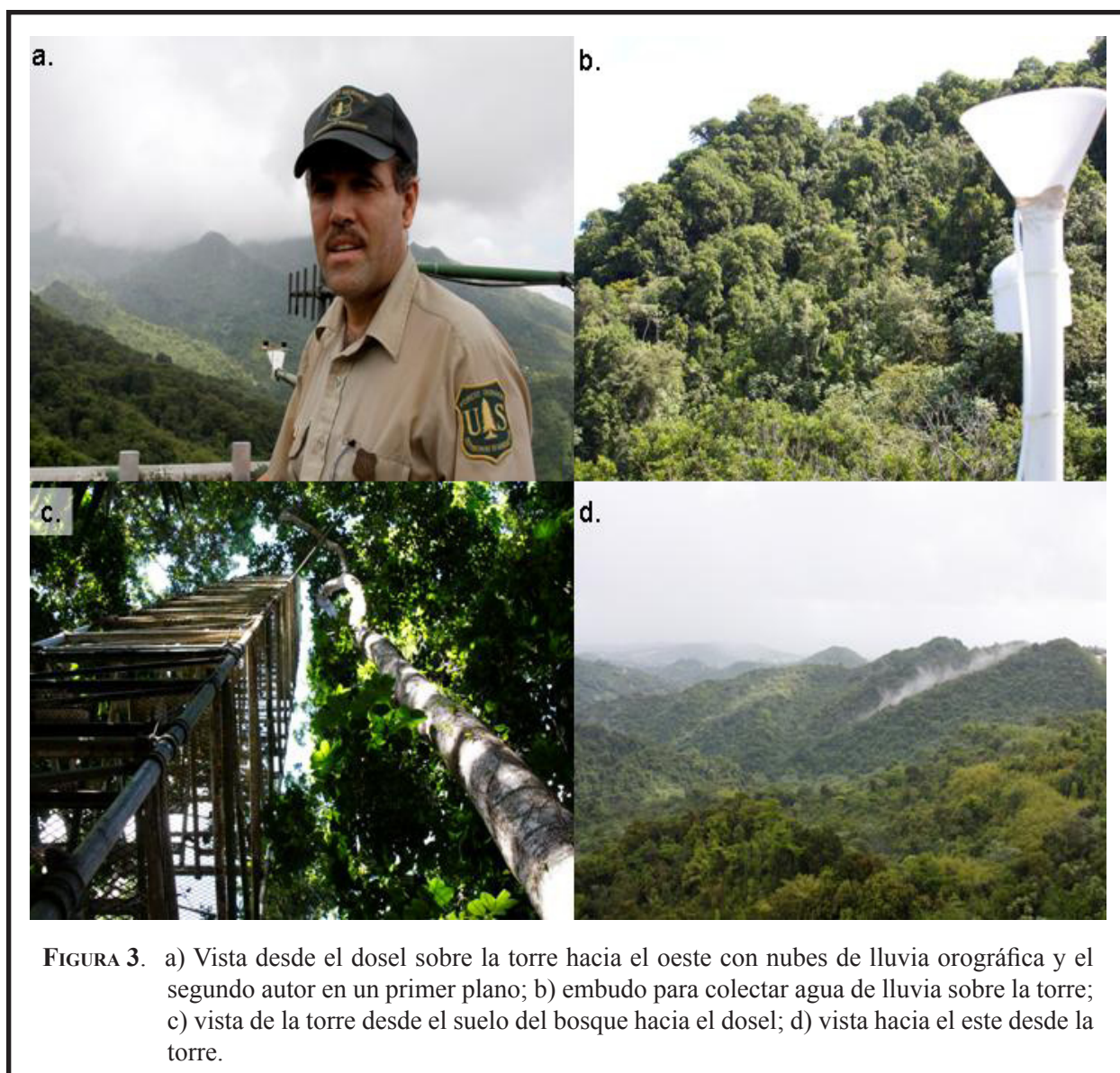
Durante cada colección, la lluvia y transcolación fueron recogidas para hacer análisis químico. El agua para el análisis de la lluvia fue recogida del colector de lluvia en la torre sobre el dosel. La muestra de transcolación era compuesta del agua recogida en ocho de los envases colectores. Estos ocho colectores de transcolación fueron seleccionados al principio del estudio porque su volumen y conductividad promedio eran similares al promedio de todas las botellas y por lo tanto se consideró que representa muy bien al lugar de estudio. Estas botellas donde se colecta la transcolación fueron limpiadas y/o substituidas de



Fig\_2 ACTA

**FIGURA 2.** Lluvia semanal promedio, con sequías locales y transpiración semanal promedio, con tormentas y huracanes, expresadas en milímetros promedio por día (mm/día). Los colores en las barras de la serie de datos identifican los meses enero en gris, febrero en amarillo, marzo en anaranjado, abril en rojo, mayo en gris oscuro, junio en verde claro, julio en verde oscuro, agosto en verde oscuro, septiembre en azul claro, octubre en azul oscuro, noviembre en cian, y diciembre en verde olivo.





**FIGURA 3.** a) Vista desde el dosel sobre la torre hacia el oeste con nubes de lluvia orográfica y el segundo autor en un primer plano; b) embudo para coleccionar agua de lluvia sobre la torre; c) vista de la torre desde el suelo del bosque hacia el dosel; d) vista hacia el este desde la torre.

ser necesario y se les colocó filtros para evitar que los coquies y la hojarasca entraran en las botellas.

Las muestras de agua fueron entregadas al laboratorio el mismo día que fueron recogidas (Figura 5). El análisis químico presentado aquí incluye desde marzo 1988 hasta diciembre 2002, y siguió los procedimientos descritos en estudios anteriores (McDowell *et al.* 1990; McDowell y Asbury 1994; McDowell 1998, Heartsill Scalley *et al.* 2007). Se midieron los siguientes componentes químicos en el agua de la lluvia y de la transcolación;  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ , TDN,  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,

K, Ca, Mg, DOC, Cl, Na,  $\text{SO}_4\text{-S}$ ,  $\text{SiO}_2$ , y pH (Tabla 1). Los protocolos y los datos originales están disponibles en la página de Luquillo LTER el set de datos #148. <http://luq.lternet.edu/data/lterdb148/metadata/lterdb148.htm>. Al traer las muestras de agua del bosque, se midió en el laboratorio el pH y la conductividad siguiendo los procedimientos especificados por NADP (1984) y McDowell *et al.* (1990).

#### *Procesamiento de datos y análisis estadístico*

Los flujos de nutrientes en la lluvia y transcolación ( $\text{kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) fueron calculados de los valores semanales de concentración de nutrientes

multiplicados por la cantidad correspondiente de lluvia o de transcolación semanal. Las tasas de enriquecimiento son la proporción de los nutrientes en la transcolación sobre los nutrientes correspondientes en la lluvia. Una sequía local se definió como las semanas con el 5 por ciento de los valores más bajos de transcolación durante el periodo del estudio.

Los resultados producto de análisis estadísticos eran consideradas significativas con una alfa de 0.05 y estos fueron calculados usando el programa SAS (versión 9, SAS Institute 2003). Cuando fue necesario, se transformaron los datos de flujo de nutrientes en la lluvia y transcolación con logaritmo natural para poder cumplir con los requerimientos del análisis estadístico paramétrico. Se utilizaron tanto correlaciones como regresiones para describir tendencias y patrones generales en los datos. Se utilizó el modelo lineal general (GLM, *proc glm* en el programa SAS) y el análisis repetido de las medidas de la variación (ANOVA) para comparar los flujos de nutrientes entre los años y meses para todos los componentes químicos medidos tanto en la lluvia como en la transcolación.



**FIGURA 4.** Colección de muestra de transcolación bajo el dosel del bosque, con el tercer autor midiendo la muestra en un cilindro calibrado.



**FIGURA 5.** Recibiendo las muestras de lluvia y transcolación del bosque para luego ser procesadas para análisis químico.

**TABLA 1.** Símbolos de nutrientes y otros componentes químicos medidos en la lluvia y transcolación en las cuencas de Bisley, Bosque Experimental de Luquillo.

| Símbolo            | Descripción                                                                                                 |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NH <sub>4</sub> -N | Amonia                                                                                                      |
| NO <sub>3</sub> -N | Nitrato                                                                                                     |
| TDN                | Nitrógeno total disuelto                                                                                    |
| PO <sub>4</sub> -P | Óxido de Fosfato                                                                                            |
| K                  | Potasio                                                                                                     |
| Ca                 | Calcio                                                                                                      |
| Mg                 | Magnesio                                                                                                    |
| DOC                | Carbono orgánico disuelto                                                                                   |
| Cl                 | Cloruro                                                                                                     |
| Na                 | Sodio                                                                                                       |
| SO <sub>4</sub> -S | Óxido de Sulfato                                                                                            |
| SiO <sub>2</sub>   | Dióxido de Sílica                                                                                           |
| pH                 | inverso de la concentración de protones (H <sup>+</sup> ), índice de acidez o alcalinidad de una sustancia. |

## RESULTADOS

### I. Patrones generales de la lluvia y transcolación por veinte años, 1988 al 2008

#### Valores anuales

El promedio para los 20 años de estudio para la lluvia y la transcolación anual fueron 3668 mm/año y 2168 mm/año, respectivamente. Los valores más altos de lluvia diaria promedio ocurrieron en 1988 ( $14.10 \pm 0.147$  mm/día) y en el 2003 ( $13.87 \pm 2.47$  mm/día, Figura 6). Mientras que los valores de lluvia promedio diarios más bajos fueron observados en 1994 ( $7.34 \pm 0.88$  mm/día), 2000 ( $7.37 \pm 0.84$  mm/día) y 2002 ( $7.26 \pm 0.74$  mm/día, Figura 6). Durante el período de 20 años de estudio, hubo solamente tres semanas donde no se pudo medir ni lluvia ni transcolación; la semana del 23 de mayo de 1989, 28 de febrero de 2006 y 30 de enero de 2007 (Figura 2). Los valores de transcolación promedio diarios más bajos ( $4.34 \pm 0.48$ ,  $4.45 \pm 0.59$  y  $3.84 \pm 0.37$  mm/

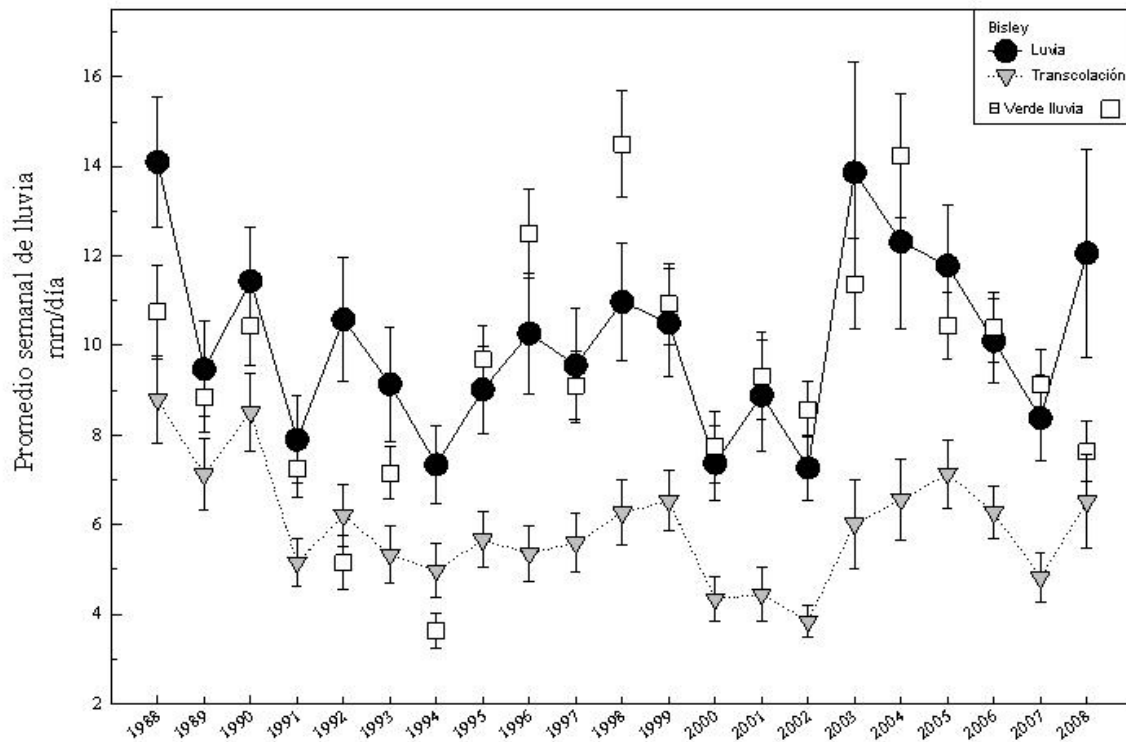
día) fueron observados en 2000, 2001 y 2002. Los valores más altos de transcolación diaria promedio ( $8.79 \pm 0.98$  y  $8.50 \pm 0.87$  mm/día) ocurrieron en 1988 y 1990 (Figura 6).

#### Valores mensuales

Marzo fue el mes con los valores mensuales promedios más bajos para lluvia y transcolación (Figura 7). Los meses de enero a marzo tenían los valores más bajos de lluvia mensual ( $F_{11,1061}=4.78$ ,  $p = 0.0001$ ) y transcolación ( $F_{11,1061}=5.97$ ,  $p<0.0001$ ) comparados con el resto del año. La lluvia en la estación de campo El Verde, en Río Grande, tuvo durante el mismo período de tiempo un valor promedio de  $9.48 \pm 16.40$  mm/día, similar a Bisley, que tuvo  $10.05 \pm 9.66$  mm/día. Sin embargo, los meses de mayo, junio, septiembre y octubre eran más secos en el El Verde que en Bisley (Figura 7). Un análisis por mes para la serie de veinte años muestra que en Bisley las lluvias de febrero han ido disminuyendo (regresión  $r^2 = 0.067$ , pendiente  $-0.234$ ,  $p = 0.019$ ,  $n = 80$ ), y



**FIGURA 6.** Promedio semanal de lluvia en milímetros por día (mm/día) por año para Bisley (círculos negros), El Verde (cuadrados blancos), y la transcolación en Bisley (triángulos invertidos grises).

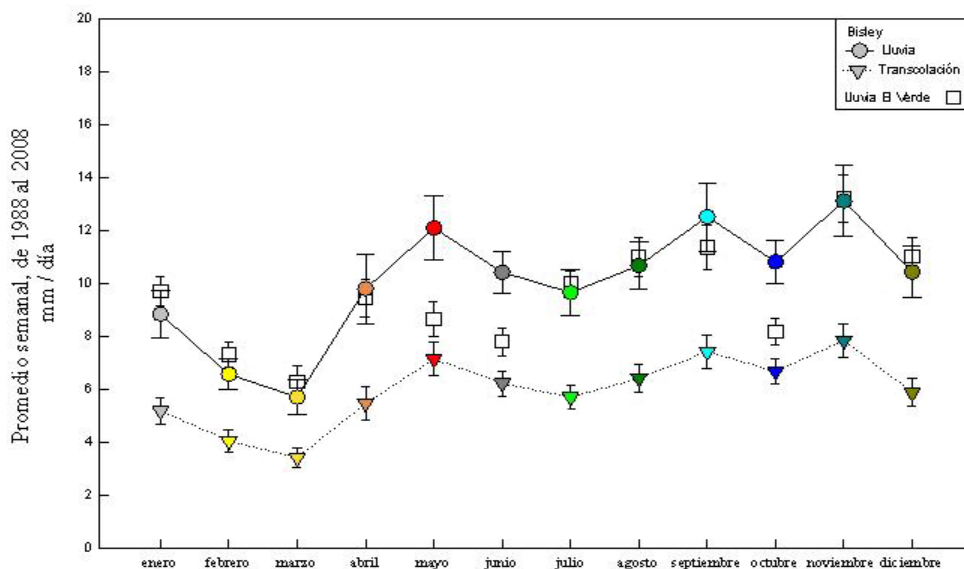


la transcolación ha disminuido aún más (regresión  $r^2 = 0.157$ , pendiente  $-0.257$ ,  $p = 0.0002$ ,  $n = 80$ ). Por otro lado, para el mes de abril las lluvias han aumentado a través de los años de estudio (regresión  $r^2 = 0.059$ , pendiente  $0.495$ ,  $p = 0.020$ ,  $n = 89$ ). En los meses de Mayo y Junio la transcolación ha tenido una tendencia a disminuir.

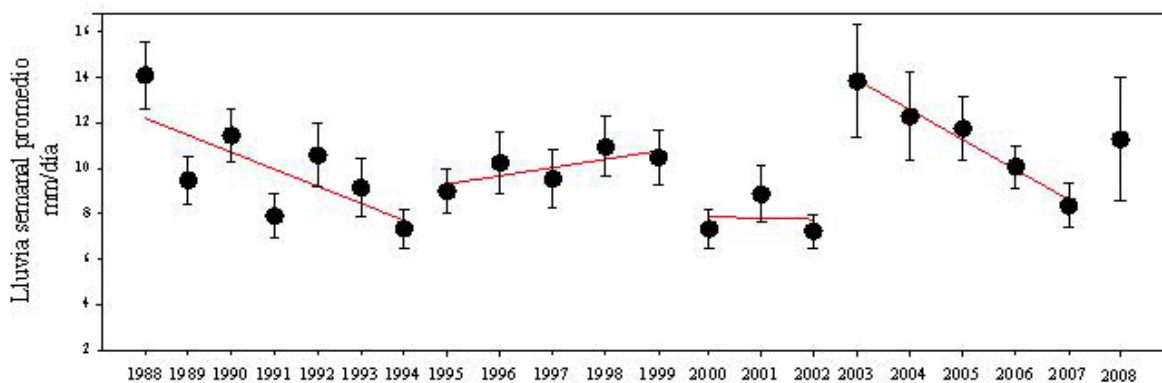
#### *Patrones interanuales*

Si tomamos en consideración los veinte años de datos de lluvia en Bisley (Figuras 2 y 6), no podemos decir que hay un patrón claro de aumento ni de disminución de la lluvia promedio diaria por año. Ahora bien, si solo observamos los datos del 1988 al 1994, hay un patrón de disminución en la lluvia anual promedio (regresión  $r^2 = 0.029$ , pendiente  $-0.039$ ,  $p = 0.002$ ,  $n = 356$ ). Si añadimos a esta serie de datos los años hasta el 2002, se mantiene este patrón de disminución, y se puede calcular

que del 1988 al 2002 la lluvia disminuye por  $0.20 \text{ mm/año}$  (Figura 8). Luego del 2002, las lluvias anuales promedio aumentan de manera significativa, con eventos de lluvias de más de  $60 \text{ mm/día}$  en el 2003; algo que no se había registrado anteriormente en los años de estudio (Tabla 2, Figura 8). Cabe señalar, sin embargo, que del 2003 al 2007 las lluvias vuelven a tener un patrón de aparente disminución (regresión  $r^2 = 0.025$ , pendiente  $-0.019$ ,  $p = 0.011$ ,  $n = 257$ ), y esto es así hasta el comienzo de la época más lluviosa en el 2008. En el 2008 se vuelven a registrar eventos de  $60 \text{ mm/día}$  (Tabla 2). Con datos solo hasta el mes de septiembre, ya se puede observar que el 2008 puede ser un año que vuelva a cambiar el patrón de disminución de lluvia del 2003 al 2007 (Figura 8). Sin embargo, para la transcolación promedio anual (regresión,  $r^2 = 0.002$ , pendiente  $-0.0889$ ,  $p = 0.011$ ,  $n = 1072$ ) si hubo una disminución débil pero significativa durante el periodo de 20



**FIGURA 7.** Promedio semanal de lluvia en milímetros por día (mm/día) por mes para Bisley (círculos), El Verde (cuadrados blancos), y la transcolación en Bisley (triángulos invertidos). Los colores utilizan la misma leyenda de la Figura 2.



**FIGURA 8.** Promedio semanal de lluvia en milímetros por día (mm/día) por año para Bisley (círculos negros) con líneas de regresión indicando patrones en periodos de años seleccionados.

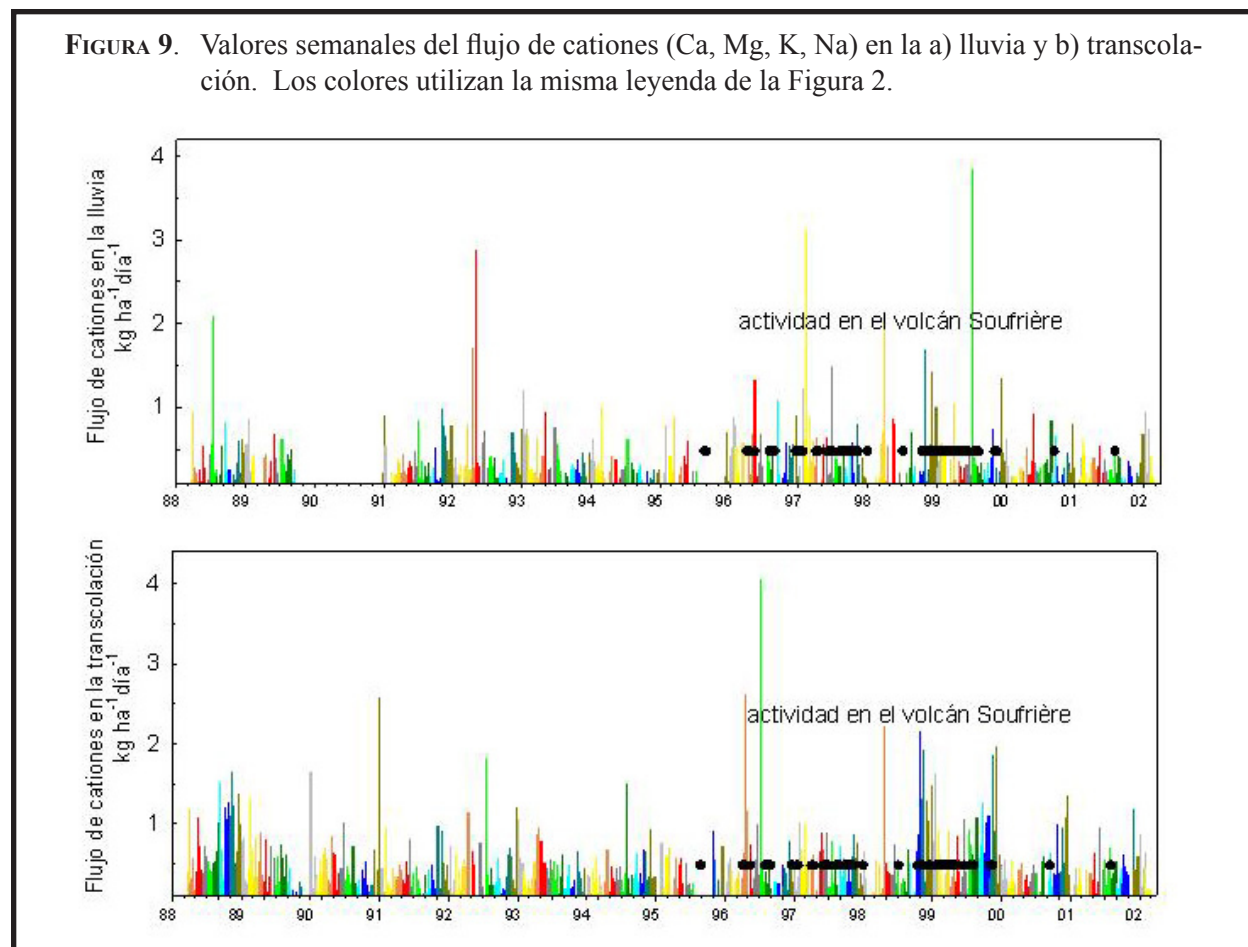
años de estudio. Esta de disminución en el valor de transcolación es menor que las variaciones asociadas a los valores promedio reportados aquí y también es menor que la variación de la lluvia diaria. (Figura 2). El pH de la lluvia, pero no el de

la transcolación, disminuyó, indicando que la lluvia está más ácida para el periodo de años analizados (correlación de Pearson con fechas de lluvia,  $r = -0.243$ ,  $p < 0.000$ ,  $n = 565$ ).

**TABLA 2.** Semanas con eventos de lluvia extremos en los últimos 20 años, 1988 al 2008. Eventos agrupados por a) años, b) meses. Sequía local es definida como el 5 por ciento de las veces en el récord de 20 años con ninguna o poca lluvia que se cuela por el dosel (transcolación) equivalente a menos que 0.5 mm por día (mm/día).

| Cantidad de semanas |            |              |              |            |              |
|---------------------|------------|--------------|--------------|------------|--------------|
| a)                  | Año        | 40-50 mm/día | 50-60 mm/día | >60 mm/día | Sequía local |
|                     | 1988       | 1            | 0            | 0          | 1            |
|                     | 1989       | 0            | 0            | 0          | 3            |
|                     | 1990       | 0            | 0            | 0          | 0            |
|                     | 1991       | 1            | 0            | 0          | 1            |
|                     | 1992       | 0            | 1            | 0          | 3            |
|                     | 1993       | 0            | 1            | 0          | 2            |
|                     | 1994       | 0            | 0            | 0          | 3            |
|                     | 1995       | 0            | 0            | 0          | 4            |
|                     | 1996       | 1            | 1            | 0          | 3            |
|                     | 1997       | 1            | 0            | 0          | 5            |
|                     | 1998       | 2            | 0            | 0          | 3            |
|                     | 1999       | 0            | 0            | 0          | 3            |
|                     | 2000       | 0            | 0            | 0          | 2            |
|                     | 2001       | 1            | 0            | 0          | 7            |
|                     | 2002       | 0            | 0            | 0          | 2            |
|                     | 2003       | 0            | 0            | 2          | 2            |
|                     | 2004       | 2            | 0            | 1          | 2            |
|                     | 2005       | 1            | 0            | 0          | 2            |
|                     | 2006       | 0            | 0            | 0          | 1            |
|                     | 2007       | 0            | 0            | 0          | 3            |
|                     | 2008       | 2            | 0            | 2          | 0            |
|                     | Total      | 12           | 3            | 5          | 52           |
| b)                  | Mes        | 40-50 mm/día | 50-60 mm/día | >60 mm/día | Sequía local |
|                     | enero      | 0            | 1            | 0          | 9            |
|                     | febrero    | 0            | 0            | 0          | 5            |
|                     | marzo      | 0            | 0            | 0          | 14           |
|                     | abril      | 0            | 0            | 2          | 4            |
|                     | mayo       | 3            | 1            | 0          | 5            |
|                     | junio      | 1            | 0            | 0          | 4            |
|                     | julio      | 0            | 0            | 1          | 3            |
|                     | agosto     | 1            | 0            | 0          | 2            |
|                     | septiembre | 2            | 1            | 1          | 0            |
|                     | octubre    | 1            | 0            | 0          | 2            |
|                     | noviembre  | 3            | 0            | 1          | 1            |
|                     | diciembre  | 1            | 0            | 0          | 3            |
|                     | Total      | 12           | 3            | 5          | 52           |

**FIGURA 9.** Valores semanales del flujo de cationes (Ca, Mg, K, Na) en la a) lluvia y b) transcolación. Los colores utilizan la misma leyenda de la Figura 2.



## II. Flujos de nutrientes en la lluvia y la transcolación, 1988 al 2002

### *Flujo de nutrientes en la lluvia*

Hubo diferencias entre años para 8 de los 12 nutrientes (ver Tabla 1 para definiciones) en la lluvia:  $\text{NH}_4\text{-N}$  ( $F_{12,325}=6.00$ ,  $p < 0.0001$ ),  $\text{NO}_3\text{-N}$  ( $F_{13,392}=3.06$ ,  $p=0.0003$ ), TDN ( $F_{10,251}=98.20$ ,  $p < 0.0001$ ),  $\text{PO}_4\text{-P}$  ( $F_{12,398}=1.93$ ,  $p < 0.0291$ ), DOC ( $F_{7,198}=9.54$ ,  $p < 0.0001$ ), Cl ( $F_{13,518}=2.58$ ,  $p=0.0018$ ),  $\text{SiO}_2$  ( $F_{12,244}=4.27$ ,  $p < 0.0001$ ), y  $\text{SO}_4\text{-S}$  ( $F_{14,536}=589$ ,  $p < 0.0001$ ). No hubo diferencias entre los años para los flujos de la lluvia de K, Ca, Mg y Na. Solamente para 2 de los 12 nutrientes en la lluvia hubo patrones a largo plazo;  $\text{NH}_4\text{-N}$  ( $R = -0.350$  de Pearson Corr,  $p < 0.000$ ,  $n = 338$ ) y  $\text{NO}_3\text{-N}$  ( $r = -0.265$  de Pearson Corr,  $p < 0.000$ ,  $n = 406$ ), estos tendieron a disminuir a través del período del estudio.

Entre los diferentes meses del año, hubo diferencias en cuanto al flujo promedio de nutrientes en la lluvia para 6 de los 12 nutrientes:  $\text{NH}_4\text{-N}$  ( $F_{11,326}=2.07$ ,  $p = 0.0218$ ),  $\text{NO}_3\text{-N}$  ( $F_{11,394}=1.82$ ,  $p = 0.0485$ ), Ca ( $F_{11,548}=2.30$ ,  $p = 0.0092$ ), DOC ( $F_{11,194}=2.37$ ,  $p = 0.0091$ ), Cl ( $F_{11,250}=2.71$ ,  $p = 0.002$ ), y Na ( $F_{11,556}=2.70$ ,  $p = 0.0022$ ). No hubo diferencias en los flujos de la lluvia de TDN,  $\text{PO}_4\text{-P}$ , K, Mg,  $\text{SO}_4\text{-S}$ , y  $\text{SiO}_2$ .

### *Flujo de nutrientes en la transcolación*

Todos los flujos de nutrientes en la transcolación tuvieron diferencias entre los años de estudio ( $F > 2.41$ ,  $p < 0.0051$ ). Comparando meses, había diferencias en los flujos de transcolación para 4 de los 12 nutrientes: TDN ( $F_{11,264}=2.23$ ,  $p = 0.0135$ ),  $\text{PO}_4\text{-P}$  ( $F_{11,406}=2.10$ ,  $p = 0.0193$ ), K ( $F_{11,655}=3.94$ ,  $p < 0.0001$ ), y Na ( $F_{11,655}=1.98$ ,  $p = 0.0281$ ). No hubo diferencias en flujos entre los meses para el  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,



$\text{NO}_3\text{-N}$ , Ca, Mg, DOC, Cl,  $\text{SO}_4\text{-S}$ , y  $\text{SiO}_2$  ( $F < 1.70$ ,  $p > 0.0698$ ).

*Correlaciones entre los nutrientes en la lluvia, la transcolación y las tasas de enriquecimiento*

Todos los componentes tenían correlaciones positivas entre la cantidad de lluvia y sus flujos de transcolación. Particularmente, había correlaciones positivas fuertes entre flujos en la lluvia y transcolación para Ca, Mg, K, y Na (correlación de Pearson  $r > 0.59$ ,  $p < 0.001$ ). Sin embargo, el volumen de la lluvia solamente explicó entre el 3 por ciento ( $\text{PO}_4\text{-P}$ ) y el 40 por ciento (Cl) de la variación en flujos de nutrientes semanales. Los flujos de nutrientes en la transcolación también fueron correlacionados a la cantidad de transcolación, que explicó de un 3 por ciento ( $\text{PO}_4\text{-P}$ ) hasta un 32 por ciento (Cl) de la variación de valores semanales. La única excepción era el flujo de transcolación de  $\text{NH}_4\text{-N}$ , ya que este no estuvo relacionado con la cantidad de transcolación (correlación de Pearson  $r = 0.066$ ,  $p = 0.173$ ,  $n = 422$ ). Había una correlación positiva entre los flujos en la lluvia de  $\text{NO}_3\text{-N}$  y  $\text{SO}_4\text{-S}$  (correlación de Pearson  $r = 0.448$ ,  $p < 0.0001$ ,  $n = 343$ ). Esta correlación estaba también presente para estos nutrientes en la transcolación, pero la correlación era más débil (correlación de Pearson  $r = 0.290$ ,  $p < 0.0001$ ,  $n = 475$ ).

Los valores medianos para las tasas de enriquecimiento semanales eran menos de uno para las sales del mar y el carbono orgánico disuelto y entre 1 y 2 para el Mg, Ca,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{SO}_4\text{-S}$  (Tabla 3). En cambio, las tasas semanales de enriquecimiento para el  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  y K eran mayores de 10. Solamente K tenía diferencias significativas en los cocientes mensuales del enriquecimiento ( $F_{11, 528} = 2.97$ ,  $p < 0.0001$ ). Los análisis indicaron que las diferencias mensuales en cocientes del enriquecimiento de K coincidieron con el mes con los flujos más altos (octubre) y más bajos (enero). Aunque no hubo diferencias mensuales significativas en las tasas de enriquecimiento de los otros nutrientes, las tasas de enriquecimiento de los cationes (Ca, Mg, K, Na) tendieron a ser más altas de septiembre a noviembre (Figura 9).

### III. Cambios en respuesta a acontecimientos atmosféricos específicos

*Tormentas tropicales y huracanes*

Durante los primeros 15 años de este estudio, un total de 10 tormentas tropicales pasaron lo suficientemente cerca como para causar aumentos perceptibles en la lluvia y la transcolación. Estos eventos variaron mucho en cuanto a la intensidad de vientos, de lluvias, duración, daño al dosel del bosque, caída de hojarasca y lluvia antes y después del evento. Cuando observamos las siete semanas antes y siete semanas después de todos estos eventos de manera combinada, hubo una tendencia de aumento en transcolación y también un aumento en los flujos de todos los nutrientes en la transcolación después de los eventos. En general, esto es así para los eventos más grandes como Hugo, Luis, Bertha y Georges, donde ocurrió caída de hojarasca de más de  $20 \text{ g m}^{-2} \text{ día}$  y se observaron cambios en la cantidad y calidad de transcolación.

Luego del huracán Hugo, se elevó la base de las nubes que residen sobre las montañas de Luquillo, afectando la producción de lluvias orográficas y esto contribuyó a causar una sequía pronunciada (Scatena y Larsen 1991). Como el dosel del bosque quedó casi sin hojas por varios meses después del huracán el dosel del bosque, las botellas de coleccionar transcolación estaban efectivamente acumulando la lluvia directa hasta que el dosel se volvió a restablecer. Durante las siete semanas después de Hugo los flujos fueron más bajos que las siete semanas antes para K, Ca, Mg y Na. Sin embargo, el flujo de  $\text{SiO}_2$  aumentó en las siete semanas después del huracán. No hubo diferencias significativas en el pH de la transcolación semanal antes y después de Hugo.

En 1996, siete años después del huracán Hugo, el bosque fue afectado por una serie de tormentas tropicales más pequeños que ocurrieron en un periodo de 2 meses (Figura 2). Ninguno de estos acontecimientos deshojaron totalmente el dosel del bosque como Hugo, ni ocurrió una sequía regional luego del paso de estas tormentas. Los valores relativos y absolutos de la transcolación eran

**TABLA 3.** Flujos y concentraciones (masa por volumen) promedio para nutrientes medidos en la lluvia y transcolación, de 1988-2002, las cuencas de Bisley, Bosque Experimental de Luquillo, Puerto Rico. La tasa de enriquecimiento es definida como la cantidad del flujo de nutrientes en la transcolación sobre el flujo en la lluvia.

|                    | Lluvia |                  |         | Transcolación |                  |          |     |                              |
|--------------------|--------|------------------|---------|---------------|------------------|----------|-----|------------------------------|
|                    | n      | flujo<br>kg/ha/d | [ ]mg/L | n             | flujo<br>kg/ha/d | [ ] mg/L | n   | mediana<br>Desv.<br>estándar |
| NH <sub>4</sub> -N | 339    | 0.002            | 0.025   | 422           | 0.018            | 0.302    | 307 | 12.4 492                     |
| NO <sub>3</sub> -N | 406    | 0.004            | 0.0451  | 553           | 0.006            | 0.1085   | 372 | 1.79 271                     |
| TDN                | 262    | 0.013            | 0.135   | 276           | 0.048            | 0.758    | 223 | 4.39 40.2                    |
| PO <sub>4</sub> -P | 411    | 0.0003           | 0.004   | 418           | 0.003            | 0.055    | 340 | 13.2 133                     |
| K                  | 559    | 0.022            | 0.219   | 666           | 0.170            | 2.815    | 539 | 10.0 17.6                    |
| Ca                 | 561    | 0.044            | 0.439   | 664           | 0.057            | 0.942    | 541 | 1.50 2.8                     |
| Mg                 | 563    | 0.037            | 0.367   | 666           | 0.036            | 0.604    | 543 | 1.12 1.5                     |
| DOC                | 207    | 0.332            | 3.569   | 232           | 0.361            | 6.301    | 188 | .80 2.4                      |
| Cl                 | 551    | 0.386            | 4.022   | 579           | 0.331            | 5.785    | 505 | .80 2.4                      |
| Na                 | 569    | 0.243            | 2.430   | 666           | 0.181            | 3.009    | 548 | .80 1.6                      |
| SO <sub>4</sub> -S | 551    | 0.126            | 1.300   | 613           | 0.149            | 2.576    | 511 | 1.49 10.3                    |
| SiO <sub>2</sub>   | 257    | 0.101            | 1.130   | 436           | 0.102            | 1.778    | 220 | 1.37 30.0                    |
| pH                 | 565    | 5.17             |         | 629           | 6.14             |          | 553 | 1.17 0.14                    |

constantemente más altos en las siete semanas que seguían a la primera de estas tormentas Bertha el (6 de julio de 1996). Sin embargo, no había diferencias antes y después del paso de Bertha para el pH de la transcolación y los flujos de  $\text{PO}_4\text{-P}$ , K, Ca, Mg, Cl, Na,  $\text{SO}_4\text{-S}$  y  $\text{SiO}_2$ . Las tasas de enriquecimiento tenían una tendencia a ser más bajas después del huracán para K, Ca, Mg, Cl y Na que en las siete semanas anteriores. En cambio, la tasa de enriquecimiento de  $\text{PO}_4\text{-P}$  tenía una tendencia a ser más alta después del huracán.

Aproximadamente dos meses después del huracán Bertha, los huracanes Hortense, (10 de septiembre de 1996) y Marilyn, (15 de septiembre de 1996), afectaron con vientos y lluvias al área de Bisley. La transcolación semanal promedio fue levemente más alta las nueve semanas después de estos huracanes comparados con las siete semanas anteriores al paso de estos (Figura 2, Bertha, Hortense, Marilyn). El pH de la transcolación fue más bajo después de estos eventos, pero no hubo diferencias en los flujos de transcolación.

El huracán Georges (22 de septiembre de 1998) menos intenso que el huracán Hugo, pero considerablemente más grande que las tres tormentas anteriores produjo en un día el 55 por ciento de la caída de hojarasca anual (Ostertag *et al.* 2003). La transcolación promedio semanal era levemente más alta durante las siete semanas después del huracán Georges, comparado a las siete semanas anteriores. Todos los nutrientes medidos en la transcolación ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ , TDN,  $\text{PO}_4\text{-P}$ , K, Ca, Mg, DOC, Cl, Na,  $\text{SO}_4\text{-S}$  y  $\text{SiO}_2$ ) semanal promedio fueron más altos en el período después del huracán, pero solamente hubo diferencias significativas en  $\text{NH}_4\text{-N}$  y  $\text{PO}_4\text{-P}$ . La tasa semanal promedio de enriquecimiento para el  $\text{PO}_4\text{-P}$  fue más alta después del huracán.

### Sequías

Las sequías locales no fueron observadas durante el mes de septiembre, y fueron más frecuentes durante el mes de marzo. Los años con más de estos periodos secos fueron 1997 y 2001

(Tabla 2). Durante estas condiciones de poca lluvia, la concentración de nutrientes en la transcolación era más alta que durante periodos normales de precipitación. Sin embargo, para las tasas de enriquecimiento habían dos patrones diferentes. Las tasas más bajas de enriquecimiento se observaron para los cationes (K, Ca, Mg), los aerosoles de sales de mar (Cl, Na) y el DOC durante estos periodos de sequía. En cambio, las tasas de enriquecimiento de  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ , TDN y  $\text{PO}_4\text{-P}$  hubo una tendencia para que aumentaran durante los periodos de sequía (Tabla 4).

### Polvo del Sahara

En la atmósfera del área del Caribe, el polvo del Sahara es común durante los meses de abril a septiembre (Prospero y Nees, 1986). En Puerto Rico es más abundante entre mayo y agosto (McDowell *et al.* 1990). De todos los componentes medidos, solamente los flujos Ca demostraron diferencias significativas entre los periodos del “polvo del Sahara” y el resto del año. Sin embargo, aun cuando hay diferencias numéricas, estadísticamente no fueron significativas. El periodo de seis meses del polvo del Sahara entre abril y septiembre contribuye aproximadamente 60 por ciento de las entradas anuales totales del Ca en la lluvia, pero solamente 50 por ciento del Ca total en transcolación. Así mismo, un poco más de Ca entra al bosque en la transcolación durante los cuatro meses más lluviosos (septiembre a diciembre); período cuando las contribuciones del polvo del Sahara se consideran ser de menor importancia relativa comparado con los cuatro meses (mayo a agosto), cuando la cantidad de polvo es mayor o más frecuente.

### Volcán en la isla de Montserrat

Durante el periodo del estudio donde se midieron los nutrientes en la lluvia y la transcolación (1988 al 2002), el volcán en la isla vecina de Montserrat, Soufrière Hills, hubo 76 semanas en las que se registró actividad sísmica y el volcán produjo nubes de ceniza de 1,800 m de altura o más (Allen *et al.* 2000, Robertson *et al.* 2000, [www.mvo.ms](http://www.mvo.ms), [www.volcano.und.edu](http://www.volcano.und.edu)). Todas estas semanas donde hubo actividad “eruptiva” ocurrieron del 1995 al 2002 y se reflejaron más en los flujos de nutrientes

**TABLA 4.** Medianas semanales para tasas de enriquecimiento y concentraciones en transcolación durante periodos con y sin sequías locales en las cuencas de Bisley, Bosque Experimental de Luquillo, Puerto Rico. Las condiciones de sequía local se definieron como el 5 por ciento más bajo de valores de transcolación durante el periodo del 1988 al 2002. Las concentraciones de transcolación para  $\text{*NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{*NO}_3\text{-N}$ , y  $\text{*PO}_4\text{-P}$  están expresadas en  $\mu\text{eq L}^{-1}$ .

|                         | Tasa de enriquecimiento |              |     |            | Transcolación<br>[ ] $\text{mg L}^{-1}$ |              |     |            |
|-------------------------|-------------------------|--------------|-----|------------|-----------------------------------------|--------------|-----|------------|
|                         | n                       | sequía local | n   | sin sequía | n                                       | sequía local | n   | sin sequía |
| $\text{*NH}_4\text{-N}$ | 8                       | 85.18        | 301 | 11.65      | 17                                      | 1939.53      | 407 | 187.22     |
| $\text{*NO}_3\text{-N}$ | 13                      | 2.78         | 361 | 1.76       | 21                                      | 190.26       | 535 | 60.52      |
| TDN                     | 6                       | 10.53        | 220 | 4.36       | 9                                       | 4.23         | 269 | 0.71       |
| $\text{*PO}_4\text{-P}$ | 11                      | 46.23        | 331 | 13.06      | 14                                      | 236.49       | 406 | 36.34      |
| K                       | 12                      | 8.07         | 529 | 10.17      | 23                                      | 9.57         | 645 | 2.70       |
| Ca                      | 12                      | 0.87         | 528 | 1.50       | 23                                      | 2.43         | 643 | 0.91       |
| Mg                      | 12                      | 0.84         | 533 | 1.12       | 23                                      | 1.77         | 645 | 0.59       |
| DOC                     | 7                       | 0.50         | 183 | 0.84       | 10                                      | 15.17        | 225 | 6.44       |
| Cl                      | 12                      | 0.73         | 495 | 0.84       | 21                                      | 17.77        | 560 | 6.33       |
| Na                      | 12                      | 0.52         | 538 | 0.81       | 23                                      | 8.13         | 645 | 3.17       |
| $\text{SO}_4\text{-S}$  | 14                      | 1.83         | 499 | 1.49       | 21                                      | 7.14         | 594 | 2.57       |
| $\text{SiO}_2$          | 5                       | 0.43         | 217 | 1.43       | 17                                      | 1.04         | 421 | 0.41       |

de la transcolación en Bisley que en los flujos de la lluvia. Las tasas de enriquecimiento promedio para los cationes fueron más altas durante los periodos de erupción, así como el flujo de cationes en la transcolación. En la lluvia, solo el flujo de TDN fue mayor durante las semanas de actividad volcánica (Tabla 5). Hubo diferencias notables en los flujos promedios de  $\text{PO}_4\text{-P}$  y  $\text{NH}_4\text{-N}$  durante las semanas de erupción. En total, en los flujos de la transcolación hubo diferencias para 10 de los 13 nutrientes medidos, todos con valores más altos durante las semanas de actividad volcánica. (Tabla 5).

Al observar las diferencias entre las semanas con y sin actividad volcánica se puede entonces estimar la contribución de nutrientes que éstas

hacen al área de estudio en Bisley. Se estima que de un 3 a un 5 por ciento del flujo de cationes proviene de la actividad volcánica. Durante las semanas de erupción se transportó un 17 por ciento del  $\text{PO}_4\text{-P}$ , lo que se considera es un 4.3 por ciento del total que llega a Bisley. De la misma manera, un 12.5 por ciento del  $\text{SO}_4\text{-S}$  entra durante las semanas de actividad volcánica, lo que representa un 3.6 por ciento del total que llega a Bisley.

## DISCUSIÓN

El agua que pasó a través del dosel de Bisley fue enriquecida provocando que el flujo total de nutrientes que llega al suelo del bosque a través de la transcolación fuera mayor que el que contribuía por la lluvia al dosel. Se observaron



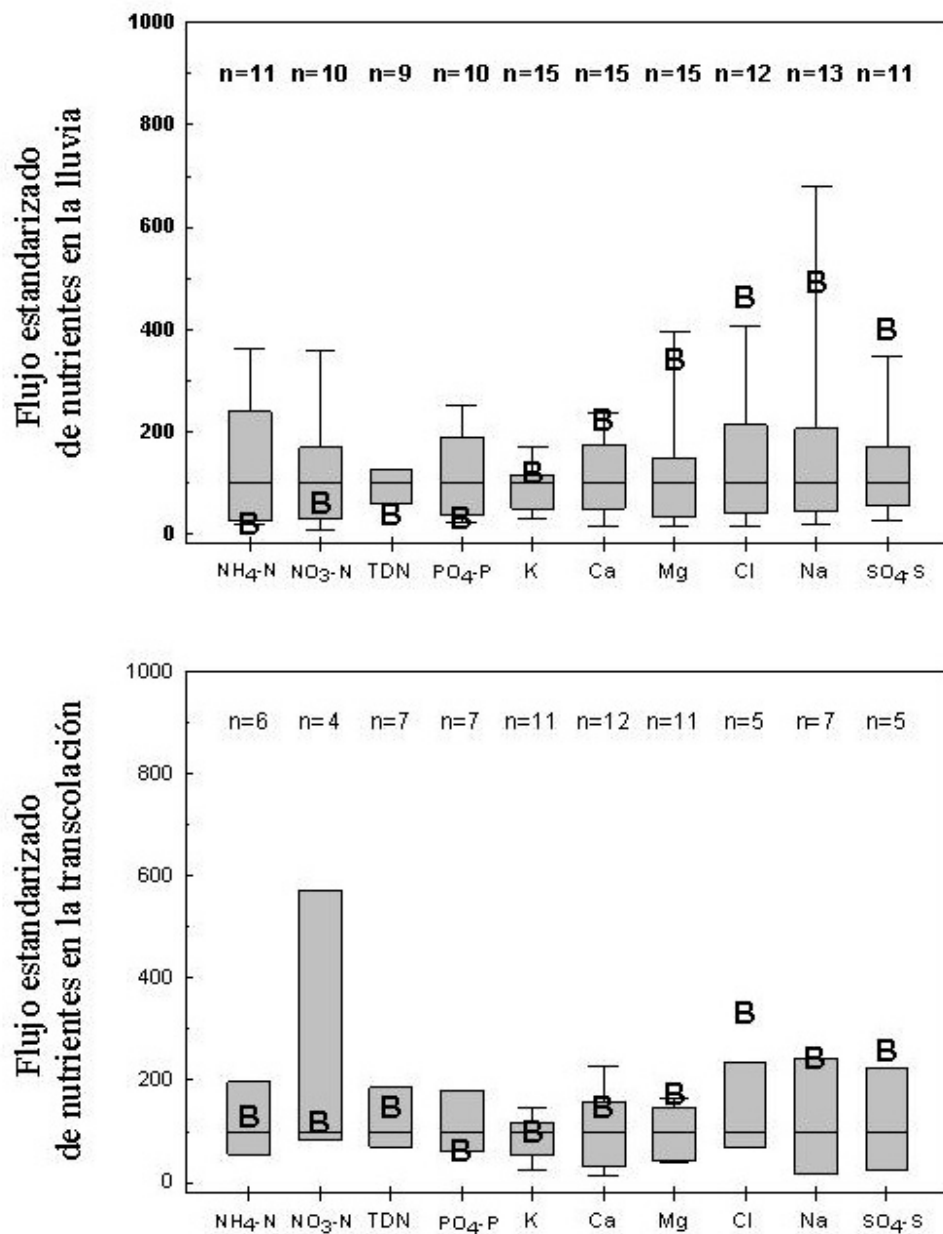
**TABLA 5.** Flujos de nutrientes  $kg\ ha^{-1}d^{-1}$  en lluvia y transcolación de las cuencas de Bisley, Bosque Experimental de Luquillo, Puerto Rico durante actividad volcánica en Soufrière, Montserrat de 1988 al 2002. Los flujos para  $*NH_4-N$ ,  $*NO_3-N$ , y  $*PO_4-P$  están expresados en  $g\ ha^{-1}d^{-1}$ . Las diferencias significativas entre períodos con y sin actividad volcánica están marcadas con un ✓

| Periodo con actividad volcánica |          |                |                       | Periodo sin actividad volcánica |                |                       |   |
|---------------------------------|----------|----------------|-----------------------|---------------------------------|----------------|-----------------------|---|
|                                 | <u>n</u> | <u>mediana</u> | <u>Desv. estándar</u> | <u>n</u>                        | <u>mediana</u> | <u>Desv. estándar</u> |   |
| <i>Lluvia</i>                   |          |                |                       |                                 |                |                       |   |
| NH <sub>4</sub> -N*             | 30       | 0.654          | 0.926                 | 308                             | 0.754          | 5.390                 |   |
| NO <sub>3</sub> -N*             | 47       | 0.905          | 3.551                 | 359                             | 1.495          | 9.402                 |   |
| TDN                             | 32       | 0.017          | 0.014                 | 230                             | 0.007          | 0.013                 | ✓ |
| PO <sub>4</sub> -P*             | 64       | 0.133          | 0.325                 | 349                             | 0.119          | 1.130                 |   |
| K                               | 62       | 0.017          | 0.043                 | 496                             | 0.013          | 0.033                 |   |
| Ca                              | 63       | 0.039          | 0.037                 | 497                             | 0.027          | 0.061                 |   |
| Mg                              | 64       | 0.025          | 0.039                 | 499                             | 0.024          | 0.053                 |   |
| DOC                             | 32       | 0.310          | 0.198                 | 174                             | 0.276          | 0.277                 |   |
| Cl                              | 67       | 0.318          | 0.395                 | 465                             | 0.291          | 0.331                 |   |
| Na                              | 63       | 0.184          | 0.241                 | 505                             | 0.181          | 0.265                 |   |
| SO <sub>4</sub> -S              | 58       | 0.063          | 0.190                 | 493                             | 0.075          | 0.196                 |   |
| SiO <sub>2</sub>                | 23       | 0.014          | 0.453                 | 234                             | 0.015          | 0.387                 |   |
| pH                              | 43       | 5.180          | 0.675                 | 522                             | 5.165          | 0.662                 |   |
| <i>Transcolación</i>            |          |                |                       |                                 |                |                       |   |
| NH <sub>4</sub> -N*             | 32       | 11.999         | 43.791                | 391                             | 9.050          | 24.601                | ✓ |
| NO <sub>3</sub> -N*             | 59       | 2.803          | 6.346                 | 496                             | 2.643          | 23.885                |   |
| TDN                             | 30       | 0.063          | 0.086                 | 246                             | 0.031          | 0.042                 | ✓ |
| PO <sub>4</sub> -P*             | 56       | 2.026          | 8.888                 | 362                             | 1.519          | 3.905                 | ✓ |
| K                               | 67       | 0.183          | 0.282                 | 600                             | 0.117          | 0.162                 | ✓ |
| Ca                              | 67       | 0.057          | 0.069                 | 598                             | 0.039          | 0.074                 | ✓ |
| Mg                              | 67       | 0.038          | 0.035                 | 600                             | 0.026          | 0.046                 | ✓ |
| DOC                             | 31       | 0.396          | 0.584                 | 201                             | 0.220          | 0.414                 | ✓ |
| Cl                              | 70       | 0.301          | 0.241                 | 510                             | 0.254          | 0.293                 |   |
| Na                              | 67       | 0.178          | 0.180                 | 600                             | 0.138          | 0.161                 | ✓ |
| SO <sub>4</sub> -S              | 57       | 0.154          | 0.216                 | 556                             | 0.110          | 0.137                 | ✓ |
| SiO <sub>2</sub>                | 50       | 0.022          | 0.032                 | 386                             | 0.024          | 0.507                 |   |
| pH                              | 42       | 6.035          | 0.345                 | 587                             | 6.170          | 0.508                 | ✓ |

diferencias constantes en el comportamiento de ciertos nutrientes (Ca, Mg, Cl, Na,  $SiO_2$ ,  $SO_4-S$  y DOC) comparados a otros (K,  $NH_4-N$ ,  $NO_3-N$ , TDN y  $PO_4-P$ ). Los flujos anuales del grupo anterior son relativamente abundantes en Bisley (Figura 10). También tienen tasas semanales de enriquecimiento relativamente bajas (Tabla 3) y son

comunes en el agua de mar y el polvo atmosférico (McDowell *et al.* 1990). En cambio, el otro grupo de nitrógeno, fósforo y potasio tenía tasas más grandes de enriquecimiento (Tabla 3) y tasas de enriquecimiento que aumentaron durante las sequías (Tabla 4). Estas diferencias reflejan la importancia de los procesos biológicos a nivel del dosel que

**FIGURA 10.** Diagrama de la caja (boxplots) de valores estandarizados del flujo de nutrientes en a) (la lluvia y b) transcolación para los bosques tropicales y subtropicales húmedos. Cada caja abarca de la 25 a la 75 percentila de los datos, y las líneas horizontales marcan las 10 y 90 percentilas. La letra B representa donde está el valor para Bisley en relación a los valores estandarizados de otros sitios. Los valores son estandarizados dividiendo el valor de un sitio particular por el valor mediano de todos los sitios y multiplicándose por 100. Los datos usados eran Brouwer (1996), Burghouts (1993) y esos compilados por Bruijnzeel (1989), McDowell (1998), Veneklaas (1990) y Liu *et al.* (2003). La N en la parte superior de cada panel es la cantidad de sitios de los cuales se obtuvo datos, tal como aparecen en las publicaciones citadas.



enriquecen la transcolación en K,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ , TDN y  $\text{PO}_4\text{-P}$ . Los procesos biológicos a nivel de dosel causan el enriquecimiento más pronunciado para el  $\text{NH}_4\text{-N}$ , cuyo flujo de transcolación semanal incluso no estuvo correlacionado a la cantidad de lluvia o de transcolación semanal. Esta carencia la correlación con la cantidad de agua también se ha observado en otros bosques tropicales (McDowell *et al.* 1990; Veneklaas 1990).

Los flujos anuales de la mayoría de los componentes en la lluvia y la transcolación de Bisley están dentro de la gama reportada para sitios tropicales y subtropicales (Figura 10). Pero las entradas anuales de la lluvia de  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ , TDN y  $\text{PO}_4\text{-P}$  tienden a ser más bajas mientras que el Mg, Cl, Na, y  $\text{SO}_4\text{-S}$  tienden a ser más altos que los reportados para otros sitios tropicales y subtropicales (Figura 10). Sin embargo, las concentraciones de estos componentes en la lluvia son similares a las observadas en la estación de campo El Verde y en otros bosques tropicales influenciados por aire marino (Asbury *et al.* 1994; Cavelier *et al.* 1997; Eklund *et al.* 1997; Waterloo *et al.* 1999; McDonald y Healy 2000). Por lo tanto, las diferencias en entradas anuales de nutrientes en la lluvia reflejan al parecer la alta cantidad de precipitación anual más bien que diferencias en la química (McDowell *et al.* 1990).

A diferencia de los cationes y las sales marinas, las entradas anuales de nitrógeno ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ , TDN) y  $\text{PO}_4\text{-P}$  en la lluvia tienden a ser levemente más bajas que lo reportado para otros bosques tropicales y subtropicales (Figura 10). Correlaciones entre los flujos de la lluvia y sus respectivas concentraciones de  $\text{NO}_3\text{-N}$  y  $\text{SO}_4\text{-S}$  en Bisley y el El Verde (McDowell *et al.* 1990) indican un cierto grado de contaminación por fuentes antropológicas. Sin embargo, los niveles relativamente bajos en Bisley tanto de nitrógeno como de otros componentes de lluvia asociados a la contaminación son al parecer debido a la carencia de fuegos en el paisaje colindante y porque el aire que llega al sitio del estudio proviene de los vientos alisios que están relativamente sin contaminación y

se originan en el Océano Atlántico. Sin embargo, los flujos anuales del nitrógeno en la transcolación de Bisley son similares a otros bosques tropicales (Figura 10) y el ecosistema del bosque en su totalidad se considera que es relativamente rico en nitrógeno (Chestnut *et al.* 1999).

Las comparaciones en las semanas antes y después de huracanes indican que la cantidad relativa de transcolación aumenta después de estos eventos. Los huracanes también tienen una tendencia a aumentar la tasa de enriquecimiento del  $\text{PO}_4\text{-P}$ . Sin embargo, otras posibles diferencias en la química de la lluvia y la transcolación antes y después de un huracán se pierden entre las diferencias en la cantidad de lluvia que trae la tormenta, la secuencia de tormentas y/o sequías y el daño que ocurra al dosel. Las diferencias mayores ocurrieron después de los dos huracanes más intensos que produjeron aumentos en caída de hojarasca de más de un 50 por ciento, sin embargo, incluso estas diferencias duraron solamente por algunos meses. Aunque la composición del bosque también se sabe que cambió dramáticamente después del huracán Hugo (Scatena *et al.* 1996), estos cambios no fueron reflejados en cambios en los flujos de transcolación. La falta de relación con los cambios sucesionales del bosque y la semejanza entre los flujos de nutrientes en la transcolación en Bisley con otros sitios tropicales (Figura 10) sugiere que los procesos fisiológicos en el dosel y en las superficies de las hojas son más importantes que la composición de especies de árboles dosel para influenciar los flujos de nutrientes en la transcolación.

Durante una sequía, la transcolación y el flujo de nutrientes es menor. También la carencia del agua que se infiltra a través del dosel reduce las tasas de enriquecimiento de cationes y las sales de mar. En cambio, las sequías aumentaron las tasas de enriquecimiento de los componentes que se ligan fuertemente a los procesos biológicos a nivel del dosel y esto sugiere que las sequías reducen la capacidad del dosel de conservar nutrientes (Edwards 1982; Richardson *et al.* 2000; Tobón *et al.* 2004).

Al prevalecer en Bisley los vientos alisios que vienen del este, llegan hasta el dosel nubes con remanentes de cenizas del volcán Soufrière, de la isla Montserrat que está a 500 km al sur de Puerto Rico (Vogt *et al.* 1998). Sin embargo, los efectos del volcán son más pronunciados en los flujos de transcolación que en los flujos de la lluvia, lo que refleja la importancia de la deposición seca independiente de los eventos de lluvia.

Durante el período del estudio, hubo disminuciones pequeñas, pero estadísticamente significativas, en la lluvia, transcolación, el pH de la lluvia y los flujos de  $\text{NH}_4\text{-N}$  y  $\text{NO}_3\text{-N}$  en la lluvia. Sin embargo, ningunas de estas disminuciones eran grandes y no había cambios a largo plazo significativos en las entradas de otros nutrientes en la lluvia tampoco hubo cambios en el pH de la transcolación y de ninguno de los nutrientes en la transcolación. Asimismo, mientras que se observaron algunas diferencias en flujos nutrientes entre años, después de huracanes, sequías, erupciones volcánicas y de períodos con polvo del Sahara, estas diferencias fueron más pronunciadas con la lluvia que con la transcolación, las cuales fueron por períodos cortos. Había también algunas diferencias en la lluvia mensual entre Bisley y El Verde, aun cuando los sitios están a solo 12 kilómetros de distancia, cubiertos por bosques similares y la precipitación anual es similar. Estas diferencias se relacionan al parecer con la mayor exposición de Bisley a los vientos alisios del noreste ya que en contraste en El Verde los vientos adiabáticos de la tarde son más pronunciados (Odum y Pigeon 1970). Mientras que estas diferencias en patrones mensuales de la lluvia pueden ser estadísticamente significativas y localmente importantes, aparentemente no son tan grandes como para que biológicamente puedan causar cambios en el tipo de bosque de estas áreas.

Los niveles relativamente altos de interceptación de lluvia en bosques tropicales y el efecto de enriquecimiento del dosel, sugieren que los cambios de uso del terreno (como la remoción de cobertura de bosque) tendrán una mayor influencia en los ciclos de nutrientes y la hidrología en estos bosques. Las observaciones presentadas aquí indican que

los procesos físicos y biológicos que se asocian al proceso de paso de agua de lluvia por el dosel del bosque sirven de amortiguador de los ciclos de nutrientes internos del bosque por las variaciones en el clima. El dosel del bosque en Bisley es un filtro activo que influencia las variaciones semanales y anuales en las entradas de nutrientes con la lluvia.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue realizada bajo la propuesta BSR-8811764 del National Science Foundation al Instituto para los Estudios de Ecosistemas Tropicales, Universidad de Puerto Rico en Río Piedras y al Instituto Internacional de Dasonomía Tropical, USDA Forest Service, como parte del programa de investigación ecológico a largo plazo (LTER) en el Bosque Experimental de Luquillo. F.N. Scatena, del Depto. Earth and Environmental Science, University of Pennsylvania y Miriam Salgado Herrera contribuyeron apoyo logístico. Evelyn Pagán, Tania del Mar López, Olga Ramos y Jorge Morales revisaron el manuscrito. Edward Camacho y los autores contribuyeron con fotos.

## LITERATURA CITADA

- Asbury, C.E., W.H. McDowell, R. Trinidad-Pizarro y S. Berrios. 1994. Solute deposition from cloud-water to the canopy of a Puerto-Rican montane forest. *Atmospheric Environment* 28(10):1773-1780.
- Brouwer, L.C. 1996. Nutrient cycling in pristine and logged tropical rain forest: a study in Guyana. University of Utrecht. 224 pp.
- Bruijnzeel, L.A. 1989. Nutrient content of bulk precipitation in south-central Java, Indonesia. *Journal of Tropical Ecology* 5:187-202.
- Burghouts, T.B.A. 1993. Spatial heterogeneity of nutrient cycling in Bornean rainforest. Vrije University. p. 47-79.
- Burghouts, T.B.A., N.M. Van Stralen y L.A. Bruijnzeel. 1998. Spatial heterogeneity of element and litter turnover in a Bornean rainforest. *Journal of Tropical Ecology* 14:477-506.
- Cavelier, J., M. Jaramillo, D. Solís y D. de León. 1997. Water balance and nutrient inputs in bulk precipitation in tropical montane cloud forest in Panama. *Journal of Hydrology* 193(1-4):83-96.

- Chestnut, T.J., D.J. Zarín, W.H. McDowell y M. Keller. 1999. A nitrogen budget for late-successional hillslope tabonuco forest, Puerto Rico. *Biogeochemistry* 46(1-3):85-108.
- Clements, R.G. y J.A. Colón. 1975. The rainfall interception process and mineral cycling in a montane rainforest in eastern Puerto Rico. Páginas 812-823 *en* F. Howell, J. Gentry y M. Smith, editores. Mineral cycling in southeastern ecosystems. US Energy Research and development Administration, Washington, DC.
- Colón, J.A. 1987. Algunos aspectos de la climatología de Puerto Rico. *Acta Científica* 1(2-3):55-63.
- Covich, A.P., T.A. Crowl y F.N. Scatena. 2003. Effects of extreme low flows on freshwater shrimps in a perennial tropical stream. *Freshwater Biology* 48:1199-1206.
- Díaz, H.F. 1996. Precipitation monitoring for climate change detection. *Meteorology and Atmospheric Physics* 60:179-190.
- Edwards, P.J. 1982. Studies of mineral cycling in a montane rain forest in New Guinea V. Rates of cycling in throughfall and litter fall. *Journal of Ecology* 70:807-827.
- Eklund, T.J., W.H. McDowell y C.M. Pringle. 1997. Seasonal variation of tropical precipitation chemistry: La Selva, Costa Rica. *Atmospheric Environment* 31(23):3903-3910.
- García Martinó, A. y A.E. Lugo. 1996. Cartilla del agua. *Acta Científica* 10(1-3): 90 pp.
- Hölscher, D., L. Köhler, C. Leuschner y M. Kappelle. 2003. Nutrient fluxes in stemflow and throughfall in three successional stages of an upper montane rain forest in Costa Rica. *Journal of Tropical Ecology* 19:557-565.
- Holwerda, F., F.N. Scatena y L.A. Bruijnzeel. 2006. Throughfall in a Puerto Rican lower montane rain forest: a comparison of sampling strategies. *Journal of Hydrology* 327:592-602.
- Larsen, M.C. 2000. Analysis of 20th century rainfall and streamflow to characterize drought and water resources in Puerto Rico. *Physical Geography* 21(6):494-521.
- Liu, W.Y., J.E.D. Fox y Z.F. Xu. 2003. Nutrient budget of a montane evergreen broad-leaved forest at Ailao Mountain National Nature Reserve, Yunnan, southwest China. *Hydrological Processes* 17(6):1119-1134.
- Loescher, H.W., J.S. Powers y S.F. Oberbauer. 2002. Spatial variation of throughfall volume in an old-growth tropical wet forest, Costa Rica. *Journal of Tropical Ecology* 18:397-407.
- McDonald, M.A. y J.R. Healey. 2000. Nutrient cycling in secondary forests in the Blue Mountains of Jamaica. *Forest Ecology and Management* 139(1-3):257-278.
- McDowell, W.H. 1998. Internal nutrient fluxes in a Puerto Rican rain forest. *Journal of Tropical Ecology* 14:521-536.
- McDowell, W.H. y C.E. Asbury. 1994. Export of carbon, nitrogen, and major ions from three tropical montane watersheds. *Limnology and Oceanography* 39(1):111-125.
- McDowell, W.H., J.J. Cole y C.T. Driscoll. 1987. Simplified version of the ampoule-persulfate method for determination of dissolved organic-carbon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 44(1):214-218.
- McDowell, W.H., C. Ginés-Sánchez, C.E. Asbury y C.R. Ramos Pérez. 1990. Influence of sea salt aerosols and long range transport on precipitation chemistry at El Verde, Puerto Rico. *Atmospheric Environment* 24(A):2813-2821.
- NADP. 1984. Instruction manual. NADP/NTP site selection and installation. National Atmospheric Deposition Program, Natural Resources Ecology Laboratory, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA.
- Odum, H.T., y R.F. Pigeon, (editores). 1970. A tropical rain forest, US Atomic Energy Commission Washington, DC.
- Ortiz-Zayas, J.R., E. Cuevas, O.L. Mayol-Bracero, L. Donoso, I. Trebs, D. Figueroa-Nieves y W.H. McDowell. 2006. Urban influences on the nitrogen cycle in Puerto Rico *Biogeochemistry* 79:109-133.
- Ostertag, R., F.N. Scatena y W.L. Silver. 2003. Forest floor decomposition following hurricane litter inputs in several Puerto Rican forests. *Ecosystems* 6(3):261-273.
- Picó, R. 1975. Nueva Geografía de Puerto Rico. Editorial Universitaria, Universidad de Puerto Rico. 460 pp.
- Proctor, J. 2005. Rainforest mineral nutrition: the 'black box' and a glimpse inside it. Páginas 422-446 *en* M. Bonell y L.A. Bruijnzeel, editores. Forests, water and people in the humid tropics. Cambridge University Press.
- Prospero, J.M. y R.T. Nees. 1986. Impact of the North African drought and El Niño on mineral dust in the Barbados trade winds. *Nature* 320:735-738.
- Richardson, B.A., M.J. Richardson, F.N. Scatena y W.H. McDowell. 2000. Effects of nutrient availability and other elevational changes on bromeliad populations and their invertebrate communities in a humid tropical forest in Puerto Rico. *Journal of Tropical Ecology* 16(2):167-188.
- SAS Version 9, SAS Institute 2003, Cary North Carolina USA.
- Scatena, F.N. 1989. An introduction to the physiography and history of the Bisley Experimental Watersheds in



- the Luquillo Mountains of Puerto Rico. New Orleans, Louisiana, USDA Forest Service, Southern Forest Experiment Station. 22 pp.
- Scatena, F.N. 1990. Watershed scale rainfall interception on two forested watersheds in the Luquillo Mountains of Puerto Rico. *Journal of Hydrology* 113:89-102.
- Scatena, F.N., y M.C. Larsen. 1991. Physical aspects of Hurricane Hugo in Puerto Rico. *Biotropica* 23(4):317-323.
- Scatena, F.N., S. Moya, C. Estrada y J.D. Chinea. 1996. The first five years in the reorganization of aboveground biomass and nutrient use following Hurricane Hugo in the Bisley experimental watersheds, Luquillo experimental forest, Puerto Rico. *Biotropica* 28(4):424-440.
- Schaefer, D.A., W.H. McDowell, F.N. Scatena y C.E. Asbury. 2000. Effects of hurricane disturbance on stream water concentrations and fluxes in eight watersheds of the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico. *Journal of Tropical Ecology* 16:189-207.
- Schellekens, J., L.A. Bruijnzeel, F.N. Scatena, N.J. Bink y F. Holwerda. 2000. Evaporation from a tropical rain forest, Luquillo Experimental Forest, eastern Puerto Rico. *Water Resources Research* 36(8):2183-2196.
- Schellekens, J., F.N. Scatena, L.A. Bruijnzeel y A.J. Wickel. 1999. Modeling rainfall interception by a lowland tropical rain forest in northeastern Puerto Rico. *Journal of Hydrology* 225:168-184.
- Tobón, C., J. Sevink y J.M. Verstraten. 2004. Solute fluxes in throughfall and stemflow in four forest ecosystems in northwest Amazonia. *Biogeochemistry* 70:1-25.
- Veneklaas, E.J. 1990. Nutrient fluxes in bulk precipitation and throughfall in two montane tropical rain forests, Colombia. *Journal of Ecology* 78(4):974-992.
- Waterloo, M.J., L.A. Bruijnzeel, H.F. Vugts y T.T. Rawaqa. 1999. Evaporation from *Pinus caribaea* plantations on former grassland soils under maritime tropical conditions. *Water Resources Research* 35(7):2133-2144.