

**APORTACIÓN DE NITRÓGENO, FÓSFORO Y SEDIMENTOS SUSPENDIDOS
DURANTE EVENTOS DE TORMENTA EN MICRO CUENCAS
DEL RÍO GRANDE DE AÑASCO, PUERTO RICO**

Por

Ronald Corvera Gomringer

Tesis sometida en cumplimiento parcial
de los requisitos para el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

en

Agronomía

UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO
RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ
2005

Aprobado por:

Luis R. Pérez Alegría, Ph.D.
Miembro, Comité Graduado

Fecha

Gustavo Martínez Rodríguez, Ph.D.
Miembro, Comité Graduado

Fecha

David Sotomayor Ramírez, Ph.D.
Presidente, Comité Graduado

Fecha

Raúl E. Zapata López, Ph.D.
Representante de Estudios Graduados

Fecha

Miguel A. Muñoz Muñoz, Ph.D.
Director del Departamento

Fecha

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a las personas más importantes de mi vida y que a pesar de la distancia han sido el motor de impulso hacia la consecución de mis metas personales y profesionales, me refiero a mi amada esposa Cecilia Arellano, a mi madre Luz Delicia Gomringer, a mis hermanos Mario y Katia.

Un espacio importante también quiero dedicarles a mis sobrinas: Valeria y a las mas pequeñas de la familia, Adriana y Ariana, que ya empezaron a formar parte de los retos de la vida y que sin conocerlas personalmente son motivo de orgullo.

A todas la personas de mi tierra natal, Madre de Dios (Perú) que han asumido el reto del desarrollo responsable mediante la búsqueda de alternativas productivas acordes con una de las zonas de mayor diversidad de planeta. A los productores agropecuarios que no desmayan en su intento por mejorar su seguridad alimentaria, pese a la marginación e incapacidad de los conductores de este importante rubro.

A mi Alma Mater y a la familia que conforma la Universidad EARTH (Costa Rica), por ser motivo de una gran satisfacción y haberme dado la posibilidad de formarme en la carrera agronómica con enfoque de manejo y conservación de recursos naturales.

RECONOCIMIENTOS

Este proyecto no habría podido ser posible sin la ayuda y soporte de muchas personas. Quiero agradecer de manera especial al presidente de mi comité; Dr. David Sotomayor Ramírez, por la confianza depositada, su guía en el proceso del estudio, apoyo logístico y brindarme la oportunidad de formar parte de su equipo de trabajo. Así mismo hacer extensivo el agradecimiento al Dr. Luis R. Pérez Alegría, por su colaboración en la parte de análisis hidrológico, dotación de equipos de campo y material digital para el desarrollo del SIG. Al Dr. Gustavo Martínez Rodríguez, por prestar garantía en la calidad de los análisis de laboratorio y el tiempo dedicado en todo el proceso de la investigación.

A mi amigo y compañero Juan Calle, por su continua y valiosa colaboración en todo el proceso de monitoreo y levantamiento de la información. A Gustavo Suárez, por la ayuda concedida en momentos claves del estudio. Al personal que administrativo del Departamento de Agronomía y Suelos de la UPRM, conformado por personas tan eficientes como la Sra. Evelyn Roselló. Al personal del NRCS – Mayagüez, en especial al Agrónomo Luis Nieves, por el apoyo en la consolidación de la información del SIG. Al Agrónomo José Castro, por el soporte en la aplicación de la metodología de Índices de fósforo para el Caribe y por proveer las versiones electrónicas correspondiente.

Finalmente quiero agradecer a mi familia, profesores y amigos por su comprensión. Es casi imposible nombrarlos a todos, pero ello no reduce su contribución y mi expresión de gratitud.

ABSTRACT

Three of the most important contaminant agents related to non-point sources are suspended sediments, nitrogen and phosphorus. This study quantified the concentration and discharges of total Kjeldhal nitrogen (TKN), total phosphorus (TP), dissolved phosphorus (DP), and suspended sediments (SS) during storm events (runoff) in two sub watersheds: Miraflores (224 ha) and Cerro Gordo (714.7 ha), which are part of the greater Río Grande de Añasco watershed in Puerto Rico. Storm events were monitored from August 2003 until July 2004. The outlets of each sub watershed were instrumented with ISCO® 3700 automatic sampling equipment, and a pressure transducer ISCO® 4200. Average concentration values for SS were 1552 mg L⁻¹ and 2738 mg L⁻¹ for Miraflores and Cerro Gordo sub watersheds, respectively. Average concentrations of TP exceeded 0.1 mg L⁻¹ (limit threshold suggested for eutrophication) for both sub watersheds, with values of 0.34 and 0.48 mg L⁻¹ for Miraflores and Cerro Gordo, respectively. Average TKN concentrations were 1.70 mg L⁻¹ for Miraflores, and 3.15 mg L⁻¹ for Cerro Gordo. These high concentrations suggest that nutrients come from non-point sources such as rural unsewered homes, and farm animals in both sub watersheds, and intensive agricultural activities in the Cerro Gordo. Discharges of SS, TP, DP and TKN (kg ha⁻¹) in the Cerro Gordo sub watershed were 4.5, 1.7, 1.5 and 2.3 times higher than those in Miraflores, respectively.

RESUMEN

Tres de los agentes contaminantes más importantes asociados a la agricultura son los sedimentos suspendidos, el nitrógeno y el fósforo. En este estudio se cuantificó la concentración y descargas de nitrógeno total Kjeldhal (NTK), fósforo total (PT), fósforo disuelto (PD) y sedimentos suspendidos (SS) en la escorrentía generada por eventos de tormenta en dos micro cuencas adyacentes: Miraflores (224 ha) y Cerro Gordo (714.7 ha) que son contribuyentes al Río Grande de Añasco en Puerto Rico. El monitoreo de los eventos de tormenta se realizó desde Agosto del 2003 a Julio del 2004. Los puntos de cierre de cada micro cuenca se instrumentaron con equipos ISCO® 3700 de muestreo automático y un sensor de presión ISCO® 4200. Los valores promedios de las concentraciones de SS fueron $1,552 \text{ mg L}^{-1}$ y $2,738 \text{ mg L}^{-1}$ para las micro cuencas de Miraflores y Cerro Gordo, respectivamente. Las concentraciones promedio de PT excedieron 0.1 mg L^{-1} (límite umbral sugerido para eutroficación) para ambas micro cuencas, con valores de 0.34 mg L^{-1} y 0.48 mg L^{-1} para Miraflores y Cerro Gordo, respectivamente. Las concentraciones promedio de NTK fueron 1.70 mg L^{-1} para Miraflores y 3.15 mg L^{-1} en Cerro Gordo. Las altas concentraciones sugieren que los nutrientes provienen de fuentes dispersas de contaminación como son las viviendas rurales sin alcantarillado y animales menores en las dos micro cuencas y combinado con la agricultura intensiva con aplicación de fertilizantes inorgánicos en el caso de Cerro Gordo. Las descargas (kg ha^{-1}) de SS, PT, PD y NTK fueron 4.5, 1.7, 1.5 y 2.3 veces mayores, respectivamente en la micro cuenca de Cerro Gordo que en Miraflores.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|-----|
| DEDICATORIA..... | ii |
| RECONOCIMIENTOS..... | iii |
| ABSTRACT | iv |
| RESUMEN..... | v |
| TABLA DE CONTENIDO..... | vi |
| LISTA DE FIGURAS..... | ix |
| LISTA DE TABLAS..... | x |
| I. INTRODUCCION..... | 1 |
| Objetivos del estudio..... | 4 |
| II. REVISION DE LITERATURA..... | 6 |
| Transporte de nutrientes y sedimentos..... | 6 |
| Mecanismos de transporte del P | 8 |
| Vías de transporte del P | 9 |
| Flujo matricial | 10 |
| Flujo preferencial..... | 10 |
| Flujo superficial..... | 10 |
| Interflujo | 11 |
| Importancia de la hidrología | 12 |
| Relación entre sedimentos y descarga de nutrientes en eventos de tormenta..... | 13 |

| | |
|---|----|
| Impacto de los usos de terreno en la descarga de nutrientes..... | 14 |
| Indice de fósforo (IP)..... | 14 |
| Erosión de suelo | 16 |
| Clase de esorrentía..... | 17 |
| Distancia al cuerpo de agua y ancho de la franja de amortiguamiento | 17 |
| Contenido de P en el suelo (CPS)..... | 18 |
| Nivel de aplicación de fertilizante inorgánico (NFI)..... | 18 |
| Método y frecuencia de aplicación de fertilizante inorgánico..... | 19 |
| Nivel de aplicación de material orgánico (NMO) | 19 |
| Método y frecuencia de aplicación de material orgánico | 19 |
| III. LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO | 21 |
| Generalidades del área de estudio..... | 21 |
| Cuenca del Río Grande de Añasco | 21 |
| IV. METODOLOGIA | 25 |
| Desarrollo del SIG para el área de estudio..... | 25 |
| Monitoreo y análisis de eventos de tormenta..... | 33 |
| Aplicación del IP..... | 41 |
| Análisis estadístico..... | 42 |
| V. RESULTADOS Y DISCUSION..... | 43 |
| Concentración de nutrientes y sedimentos suspendidos | 43 |
| Cuantificación de carga de nutrientes y sedimentos suspendidos | 49 |
| Análisis de correlación..... | 55 |

| | |
|---|-----|
| Indice de P..... | 59 |
| VI. CONCLUSIONES | 62 |
| VII. RECOMENDACIONES..... | 65 |
| LITERATURA CITADA..... | 66 |
| APENDICES | 72 |
| Apéndice A: Descripción de suelos, según Gierbolini (1975)..... | 73 |
| Apéndice B: Hidrogramas de escorrentía para micro cuenca Miraflores | 76 |
| Apéndice C: Hidrogramas de escorrentía para micro cuenca Cerro Gordo..... | 84 |
| Apéndice D: Flujo promedio diario y precipitación en micro cuenca Miraflores y Cerro Gordo | 92 |
| Apéndice E: Reporte estadístico | 93 |
| Apéndice F: Regresiones lineales para micro cuenca Miraflores y Cerro Gordo ($P < 0.05$) | 94 |
| Apéndice G: Muestreo con botella fija I-CHEM® | 105 |
| Apéndice H: Información sobre precipitación pluvial durante el periodo de estudio . | 107 |
| Apéndice I: Lista de abreviaturas | 109 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Mecanismos y formas de P transportado en el flujo Superficial (Tomado de Daniel et al., 1998)..... | 12 |
| Figura 2. Mapa de ubicación de las micro cuencas Miraflores y Cerro Gordo dentro del área de la cuenca de Añasco..... | 24 |
| Figura 3. Modelo de elevación digital en micro cuencas Miraflores y Gordo..... | 26 |
| Figura 4. Mapa de uso de terreno en micro cuenca Miraflores..... | 27 |
| Figura 5. Mapa de uso de terreno en micro cuenca Cerro Gordo..... | 28 |
| Figura 6. Mapa de suelos en micro cuenca Miraflores..... | 31 |
| Figura 7. Mapa de suelos en micro cuenca Cerro Gordo..... | 32 |
| Figura 8. Equipos de muestreo: muestreador automático ISCO® 3700 (A) y sensor de presión ISCO® 4220 (B)..... | 35 |
| Figura 9. Sección transversal del punto de muestreo en micro cuenca Miraflores..... | 38 |
| Figura 10. Sección transversal del punto de muestreo en micro cuenca Cerro Gordo..... | 38 |
| Figura 11. Curva de descarga para la micro cuenca Miraflores..... | 39 |
| Figura 12. Curva de descarga para la micro cuenca Cerro Gordo..... | 39 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Peso asignado a los parámetros del índice de fósforo (IP) para la zona del Caribe..... | 16 |
| Tabla 2. Distribución de usos de terreno y proporción de áreas en micro cuencas estudiadas..... | 30 |
| Tabla 3. Programación de equipos de muestreo y precipitación pluvial en micro cuenca Miraflores | 36 |
| Tabla 4. Programación de equipos de muestreo y precipitación pluvial en micro cuenca Cerro Gordo | 37 |
| Tabla 5. Concentración de sedimentos suspendidos (SS), fósforo total (PT), fósforo disuelto (PD) y nitrógeno total Kjeldhal (NTK) durante eventos de tormenta en micro cuenca Miraflores | 46 |
| Tabla 6. Concentración de sedimentos suspendidos (SS), fósforo total (PT), fósforo disuelto (PD) y nitrógeno total Kjeldhal (NTK) durante eventos de tormenta en micro cuenca Cerro Gordo..... | 47 |
| Tabla 7. Valores promedios y significancia estadística de parámetros físicos y químicos en micro cuencas estudiadas..... | 48 |
| Tabla 8. Valores promedios de las concentraciones de parámetros físicos y químicos obtenidos en muestreos manuales de Mayo del 2002 a Diciembre del 2003 en micro cuencas estudiadas..... | 48 |
| Tabla 9. Valores promedio y significancia estadística de parámetros físicos y químicos en micro cuenca Cerro Gordo, separado por eventos de tormenta muestreados completamente versus muestreos incompletos (ascenso y pico de escorrentía)..... | 49 |
| Tabla 10. Carga de sedimentos suspendidos (SS), fósforo total (PT), fósforo disuelto (PD) y nitrógeno total Kjeldhal (NTK) durante eventos de tormenta en micro cuenca Miraflores..... | 53 |
| Tabla 11. Carga de sedimentos suspendidos (SS), fósforo total (PT), fósforo disuelto (PD) y nitrógeno total Kjeldhal (NTK) durante eventos de tormenta en micro cuenca Cerro Gordo | 54 |

| | |
|---|----|
| Tabla 12. Descarga total estimada de sedimentos suspendidos, nutrientes y volumen de agua asociados a eventos de tormenta para micro cuencas estudiadas..... | 55 |
| Tabla 13. Coeficientes de correlación de Pearson para parámetros físicos y químicos en micro cuenca Miraflores .Sólo se incluyeron los coeficientes con $P < 0.05$ | 57 |
| Tabla 14. Coeficientes de correlación de Pearson para parámetros físicos y químicos en micro cuenca Cerro Gordo. Sólo se incluyeron los coeficientes con $P < 0.05$ | 57 |
| Tabla 15. Ecuaciones de regresión lineal entre el volumen (variable independiente) ¹ versus parámetros físicos y químicos (variables dependientes) ² en micro cuencas Miraflores, Cerro Gordo y ambas combinadas. Sólo se incluyeron ecuaciones con coeficientes $P < 0.05$ | 58 |
| Tabla 16 Ecuaciones de regresión lineal entre carga de sedimentos suspendidos (variable independiente) ¹ versus cargas de parámetros químicos (variables dependientes) ² en micro cuencas Miraflores, Cerro Gordo y ambas combinadas. Sólo se incluyeron ecuaciones con coeficientes $P < 0.05$ | 59 |
| Tabla 17. Indices de P en predios evaluados dentro del área de influencia de micro cuenca Miraflores..... | 60 |
| Tabla 18. Indices de P en predios evaluados dentro del área de influencia de micro cuenca Cerro Gordo..... | 61 |

I. INTRODUCCION

La eutroficación debido a concentraciones elevadas de nutrientes ha sido identificada como un problema crítico en las aguas superficiales en los Estados Unidos (USEPA, 1986; Parry, 1998). Aunque esto también se puede observar en algunos cuerpos de agua superficiales en Puerto Rico existe información limitada sobre el estatus nutricional de los mismos (Negrón, 1983; Vachier, 1994; Ramos-Guínés, 1997). El proceso de eutroficación se acelera con el incremento de nutrientes en los cuerpos de agua. Estos niveles elevados de nutrientes causan a menudo producción anormalmente alta de algas y de plantas acuáticas. La descomposición eventual de las mismas reduce a niveles críticos el contenido del oxígeno disuelto del agua superficial que causan la muerte de peces y otros organismos acuáticos (USEPA, 1996). Los ríos exportan grandes cantidades de nitrógeno (N) y fósforo (P) a los lagos y las aguas costeras donde se ven los efectos adversos del enriquecimiento nutricional más claramente (Ramos-Guínés, 1997; Castillo et al., 2000).

Tres de los agentes contaminantes más importantes asociados a la agricultura son los sedimentos, el N y el P. Beuselinck et al. (2000) precisaron que el sedimento es el mayor agente contaminante del agua en términos de volumen. Es común que la aportación de los nutrientes esté asociado a los sedimentos. De todas las entradas de nutrientes a los cuerpos de agua proveniente de la agricultura, el P ha sido identificado como el más importante, debido a que un aumento en sus niveles naturales promueve la productividad biológica en las aguas superficiales que normalmente está limitada por su disponibilidad (Needelman et al., 2001). Las fuentes de contaminación por nutrientes y sedimentos de las aguas superficiales son numerosas y no sólo se atribuye a las

actividades agrícolas. Diversas fuentes puntuales y dispersas de contaminación como son comunidades urbanas sin alcantarillado, comunidades sub urbanas y áreas rurales, botaderos de basura también han sido identificadas como las mayores contribuyentes de nutrientes en la superficie de las aguas de Puerto Rico (Vachier, 1994).

Evidencias científicas indican que para evitar la eutroficación causada por el P, las concentraciones de fósforo total (PT) no deben exceder de 0.05 mg L^{-1} en la corriente de entrada a un lago y que para prevenir el crecimiento de plantas acuáticas en la corriente de agua, la descarga directa a un lago o embalse no debe exceder 0.1 mg L^{-1} (USEPA, 1986; Daniel et al., 1998). Sotomayor-Ramírez et al. (2001) resumieron la concentración de PT en 21 estaciones de monitoreo de calidad de agua de 11 ríos en Puerto Rico desde 1989 a 1997. Cuatro ríos tuvieron concentraciones medias de PT que excedieron 0.1 mg L^{-1} (límite umbral sugerido para eutroficación) y los siete ríos restantes tuvieron al menos 25% de los episodios muestreados con concentraciones de PT que excedieron de 0.1 mg L^{-1} . Ramos-Guínés (1997) reportó que la concentración de PT en el Lago Cidra, Puerto Rico, se incrementó de 0.28 mg L^{-1} en 1981 a 1.7 mg L^{-1} en 1991.

El transporte de sedimentos asociado a nutrimentos como el N y P del suelo que llega a los cuerpos de agua es compleja porque está influenciada por algunos procesos como la erosión del suelo, transporte de sedimentos y deposición (Gburek et al., 2000) y por parámetros como la precipitación pluvial y características superficiales del suelo que son variables en tiempo y espacio. Todos esos factores presentarán valores variados de pérdida de nutrientes. No obstante, para identificar y cuantificar la contaminación de nutrientes provenientes de fuentes dispersas como la agricultura, se requiere información

sobre los flujos de contaminantes, sus orígenes y mecanismos de transferencia (Dorioz et al., 1998).

Estudios previos han cuantificado las pérdidas de fuentes específicas a escalas de parcela y pequeñas cuencas bajo variadas prácticas de manejo y para diferentes vías de transporte de los nutrientes. En contraste, otros estudios han considerado las pérdidas provenientes de varias fuentes y cuantificado ellas a nivel de cuenca (Owens et al., 1991; Correll et al., 1999; Steegen et al., 2001; Sharpley y Tunney, 2000). Desafortunadamente, estudios a esta escala son también muy costosos (Sharpley et al., 1994). En lugar de ellos, estudios a escala de micro cuencas pueden ser adoptados y los resultados extrapolados para proveer información real y confiables a escala de cuenca. Sin embargo, para extrapolar los resultados es necesario entender las características específicas del suelo, condiciones hidrológicas, diferentes coberturas de los cultivos y prácticas de los cultivos que influyen en el transporte de P en diferentes condiciones climáticas y geológicas (Johnes y Hodgkinson, 1998). Un entendimiento de esos procesos a escalas de micro cuenca podrían identificar las vías que siguen los nutrientes a escala de cuenca, el cual es esencial para el modelaje futuro que incluya toda la cuenca del Río Grande de Añasco.

No está claro si iguales patrones temporales de exportación de N y de P serían observados para cuencas tropicales adyacentes con diferentes usos de terreno, las cuales estarían sujetas a las mismas fuerzas hidrológicas, pero con diferentes entradas temporales (ejemplo: sistemas de pozo séptico en cuencas dominadas por uso suburbano versus tierras agrícolas con fertilización). Por ello, es importante la cuantificación de variaciones temporales de la salida de nutrientes y flujos hidrológicos de cuencas que representen todo el espectro de tipos de uso de la tierra.

Debido a que muchos factores influyen en los aportes de nutrientes a una escala de micro cuenca, el presente estudio se estará concentrando en proveer información cuantitativa sobre la concentración y descargas de nitrógeno total Kjeldhal (NTK), fósforo total (PT), fósforo disuelto (PD) y sedimentos suspendidos (SS) durante eventos de tormenta que hipotéticamente son dominados por fuentes dispersas de contaminación. El área estudiada se localiza en la cuenca del Río Grande de Añasco. Se seleccionaron estratégicamente dos micro cuencas adyacentes que son contribuyentes a éste río: Miraflores y Cerro Gordo; las cuales presentan características contrastantes en usos de terreno y no se cuenta con información histórica a este nivel de investigación. Los resultados obtenidos en este estudio pueden extrapolarse a otras cuencas de similar tamaño y usos de terreno.

Objetivos del estudio

El objetivo general del estudio es cuantificar las aportaciones de N, P y SS durante eventos de tormenta en dos micro cuencas adyacentes contribuyentes del Río Grande de Añasco.

Los objetivos específicos del estudio son:

- Cuantificar las concentraciones y descargas de NTK, PT, PD y SS durante eventos de tormenta.
- Relacionar las concentraciones de NTK, PT, PD y SS con las características de uso de terreno y descarga hidrológica de cada micro cuenca.
- Determinar el riesgo potencial del transporte y movimiento del P hacia los cuerpos de agua mediante la aplicación de índices de P desarrollados para la zona del caribe.

Hipótesis:

- Las concentraciones de TKN, PT, PD y SS difieren entre micro cuencas debido a los usos de terreno y magnitud del flujo de tormenta.
- La micro cuenca con mayor área y proporción de actividades agrícolas tendrá un aporte proporcionalmente mayor de TKN, PT, PD y SS que la micro cuenca con menor actividad agrícola.

II. REVISION DE LITERATURA

Transporte de nutrientes y sedimentos

El transporte de nutrientes de ambientes terrestres puede ser por medio de una fase disuelta o a través del movimiento de sedimentos (Sharpley y Menzel, 1987). El PD (soluble) en la escorrentía se origina de la liberación del P de la zona superficial del suelo (1-2.5 cm) y/o material vegetal que interactúa con la lluvia (Sharpley et al., 1994). El transporte de PD depende de reacciones de adsorción-desorción (Sharpley et al., 1992) y del contenido de P en la superficie del suelo (Sharpley et al., 2000) los cuales lideran su movimiento en eventos de escorrentía. Los nutrientes particulados (suspendidos o sedimentos) están asociados con el suelo y el material vegetativo erodado durante la escorrentía. En la mayoría de los casos el N y P particulados son típicamente la forma dominante de la pérdida de nutrientes (David y Gentry, 2000; Vaithiyanathan y Correll, 1992). En un estudio realizado en cuatro micro cuencas adyacentes en Maryland que cuantificó las descargas de N y P disueltos y particulados durante 76 eventos de tormenta, se encontró que el P particulado fue en promedio el 83% y el N particulado de 84% de la carga total (Correll et al., 1999). Para tener el impacto total de la pérdida de nutrientes se deben cuantificar las formas disueltas y las asociadas a partículas (Stevens et al., 1999).

El P disponible para las algas es el PD y la porción de P particulado que está en equilibrio con el PD (Sharpley et al., 1996). Sonzogni et al. (1982) definieron el P disponible para las algas como, la cantidad de P inorgánico que una población de algas deficiente en P puede utilizar en un periodo de 24 horas o más. El P particulado disponible para las algas está en función de la pérdida de suelo, tamaño de la partícula

enriquecida y las propiedades químicas del material erodado que gobiernan la adsorción de P y su disponibilidad. La medida de P disponible para las algas es esencial para estimaciones precisas del impacto del manejo de prácticas agrícolas en las superficies de agua (Sharpley et al., 1992).

El proceso de enriquecimiento por P está asociado principalmente con el transporte del material sólido, y se reconoce la importancia que juega el sedimento suspendido en la remoción del ortofosfato soluble (biológicamente disponible) de la solución (Logan y Schwap, 1976). En estudios basados en cuantificaciones fluviales anuales se encontró que la proporción de SS/PT estuvieron en rangos de 78 a 95% (Johnson et al., 1976; Logan y Schwap, 1976).

Algunos factores que controlan la exportación de nutrientes en terrenos agrícolas pueden ser categorizados como los que influyen en la fuente del nutriente y los que influyen en su transporte (Gburek et al., 2000; Sharpley y Tunney, 2000). Las fuentes de nutrientes incluyen aportes de N y de P como el estiércol animal, los fertilizantes y los aportes del mismo suelo; mientras el transporte es facilitado por la topografía y el movimiento del agua a través del paisaje. Los mecanismos ligados a las fuentes y transporte incluyen a la solubilidad de N y de P y/o su separación que contiene las partículas en la solución (McDowell et al., 2001). Edwards y Daniel (1993) demostraron la influencia de las fuentes de contaminación y su manejo con relación a las pérdidas de P en cuencas y encontraron que las concentraciones del fósforo disuelto reactivo (PDR) en la esorrentía superficial se incrementaron 60 veces (0.8 a 47.0 mg L⁻¹) al enmendar parcelas con pollinaza con niveles de 0 y 870 kg de N ha⁻¹.

Mecanismos de transporte del P

Las entradas de P por fertilizantes y estiércol al suelo son retenidos por pequeñas partículas, por lo tanto, la adición de P no es redistribuida uniformemente a través de todo el perfil del suelo (House et al., 1998). Los niveles de P en el suelo tienden a ser mayores en las capas superficiales del suelo. El desprendimiento del suelo y transporte en la escorrentía superficial preferentemente erosionan partículas finas. Esto resulta en material erosionado con alto contenido de PT comparado con el contenido original del suelo (Sharpley et al., 2000); este fenómeno es referido como enriquecimiento. Las partículas finas y ligeras son transportadas grandes distancias y es más probable que entren a los cuerpos de agua. Debido a la erosión selectiva de material fino desde algunos centímetros de la superficie, las pérdidas de PT son mayores que las predichas para todo el perfil del suelo (House et al., 1998).

Haygarth y Jarvis (1999) identificaron 3 mecanismos principales del transporte de P denominados: disolución, físico e incidental. La disolución describe el transporte de PD con partícula $<0.45\text{mm}$ y explica el equilibrio que ocurre entre las partículas del suelo o sitios de adsorción y la solución del suelo. Ejemplos de disolución son la adsorción-desorción y solubilización de P en suelos saturados (Haygarth y Sharpley, 2000; Haygarth y Jarvis, 1999). El PT es movido principalmente por mecanismos físicos como la erosión del suelo. Conforme se incrementa la intensidad de los mecanismos físicos como la erosión, las concentraciones de PT en la escorrentía se incrementan (Sharpley et al., 1992). En contraste con la disolución, los mecanismos erosivos son procesos a macro escala (Haygarth y Jarvis, 1999). Los mecanismos incidentales son conceptualmente diferentes que los de disolución y físicos debido a que son controlados por condiciones

instantáneas (Haygarth y Jarvis, 1999). Ejemplos son transportes a corto plazo de materiales particulados de fincas enmendadas con fertilizante fosforado y estiércol. El corto periodo de transporte ocurre después de lluvias efectivas que remueven la enmienda en muy poco tiempo después de ser aplicado. Los factores de manejo de uso de la tierra y la hidrología tienen una incidencia directa sobre los tres mecanismos de transporte de P (Sharpley et al., 2000).

Vías de transporte del P

La más reciente clasificación, hecha por Haygarth y Sharpley (2000) está organizada alrededor de características de espacio y tiempo. Las vías más importantes para el transporte de P desde los terrenos de uso agrícola son: flujo matricial, flujo preferencial, flujo superficial e interflujo. Estas vías de transporte de P se interrelacionan durante cada evento de precipitación. Por ejemplo, el movimiento de agua y el PD asociado que se transportan por una pendiente pueden ser de flujo superficial, interflujo o flujo profundo, con potencial de intercambio entre ellas según el grado de saturación del suelo, pendiente y capacidad de infiltración (Johnes y Hodgkinson, 1998).

El término escorrentía es comúnmente usado para referirse a una vía hidrológica pero también puede usarse en un sentido general para describir todas las vías mencionadas anteriormente a una escala de micro cuenca (Haygarth and Sharpley, 2000). Las cuatro vías mencionadas ocurren en zonas no saturadas; sin embargo, el flujo subterráneo de agua (condiciones saturadas) también puede ser una vía importante por la cual las aguas llegan a los canales. Pocos estudios han evaluado las contribuciones de P de los flujos subterráneos. La principal razón es que las concentraciones de P del agua de

subsuelo son pequeñas comparadas con el transporte en la zona no saturada (Peterjohn y Correl, 1984). Sin embargo, Phillips et al. (1982) encontraron que las concentraciones de PD en aguas subterráneas no cambian con la profundidad a través del tiempo, pero fueron de 10 a 20 $\mu\text{g L}^{-1}$, concentraciones que son suficientemente altas para causar eutroficación.

Flujo matricial: El flujo matricial es el movimiento uniforme del agua por el perfil del suelo a través de los macro y micro poros del suelo. Típicamente, hay un pequeño movimiento de P en la vía del flujo matricial debido a que la superficie del suelo acumula la mayor parte de P (Mozaffari y Sims, 1994).

Flujo preferencial: El flujo preferencial es también un movimiento de agua a través del perfil del suelo ocasionado por fisuras y agrietamientos. El agua se mueve muy rápido con poca opción de adsorción; por lo tanto, hay un gran transporte de P (Addiscott et al., 2000). El flujo preferencial ocurre en suelos pesados, suelos ricos en arcillas expansibles y ocurre debido a las rupturas que se desarrollan en respuesta a la sequía o a la humedad y donde hay una alta densidad de población de lombrices de suelo u otros organismos barrenadores.

Flujo superficial: El flujo superficial es el movimiento del agua por la superficie del suelo a lo largo de la pendiente durante eventos de escorrentía (figura 1). Este flujo ha sido tradicionalmente considerado como la vía más importante de transporte de P en sistemas agrícolas (Sharpley et al., 1993). El flujo superficial es importante, primero porque la gran concentración de P está en las capas superficiales del suelo y segundo

porque la gran concentración de energía hidrológica está sobre la superficie del suelo (Haygarth et al., 1998). Las propiedades físicas del suelo, cobertura vegetal y las pendientes abruptas determinan la eficiencia de esta vía en las pérdidas de P (Sharpley y Syers, 1976) que pueden variar de acuerdo a la hidrología del sitio, volúmenes relativos de drenaje y cambios en las características del suelo relacionadas con el P (Sharpley y Tunney, 2000).

Interflujo: El interflujo es el movimiento lateral del agua en el suelo. Típicamente, la pérdida de P en el interflujo es menor que en el flujo superficial. Por ejemplo, en un estudio realizado por Alberts y Spomer (1985) en tres cuencas agrícolas cultivadas con maíz, encontraron que el promedio de pérdida de PD del flujo superficial en un periodo de 10 años de evaluación fue entre 0.105 y 0.381 kg ha⁻¹, mientras que la pérdida por interflujo fue entre 0.028 y 0.031 kg ha⁻¹.

Stevens et al. (1999) encontraron que el flujo superficial fue la mayor vía en suelos llanos, con textura areno-arcillo-limoso en el horizonte A y de textura medianamente pesada en (arcillo-limoso) en el horizonte B. Pero para suelos arenosos en el horizonte A y arcillosos en el horizonte B con baja conductividad hidráulica, el interflujo fue la mayor vía de transporte de P. El interflujo provee la mayor proporción de flujo en muchas de las cuencas y puede ser el mayor contribuyente de P (Sharpley et al., 1976).

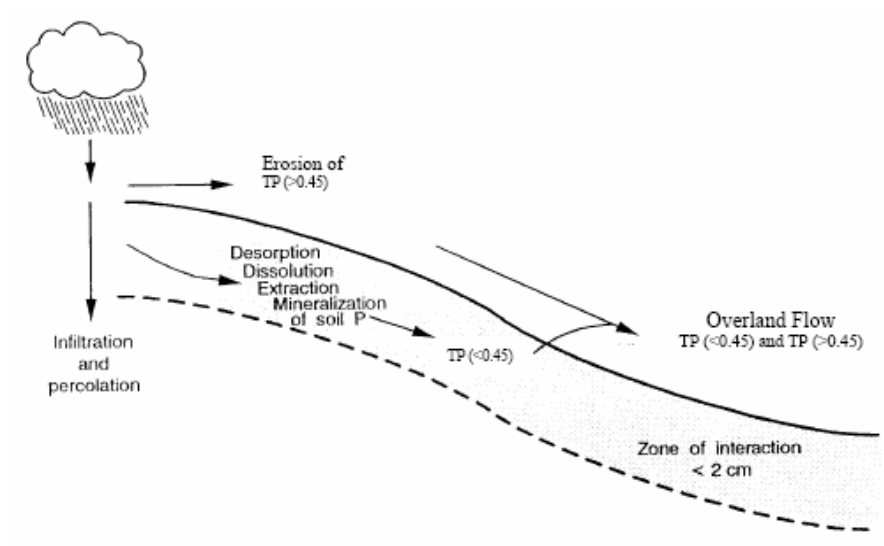


Figura 1. Mecanismos y formas de P transportado en el flujo superficial (tomado de Daniel et al., 1998).

Importancia de la hidrología

Los efectos hidrológicos pueden ser separados en efectos temporales y espaciales. Los efectos temporales tienen dos niveles principales de transporte de nutrientes. El nivel 1 está asociado con el flujo base y el nivel 2 está asociado con el flujo de escorrentía (Haygarth y Jarvis, 1999). Evans (1978) encontró que 7.5 mm/día de lluvia pueden causar erosión, mientras que 5 mm/hora o más de lluvia es considerada como alta intensidad y puede causar erosión severa. Los efectos hidrológicos espaciales pueden ser divididos en perfil del suelo, pendiente y efectos de la cuenca. El perfil del suelo describe las vías de transporte de agua vertical (flujo matricial y flujo preferencial). La pendiente describe las vías de agua laterales (flujo superficial e interflujo). Finalmente, las cuencas incluyen variables de usos de terreno con diferentes grados de cobertura vegetal que son importantes en la aportación de sedimentos y nutrientes.

Relación entre sedimentos y descarga de nutrientes en eventos de tormenta

Es bien conocido que existe una fuerte correlación entre la concentración de sedimentos suspendidos (CSS) y el PT en el sedimento (Holtan et al., 1988). En dos micro cuencas agrícolas localizadas en Bélgica se observó un comportamiento logarítmico en la función que relacionó la CSS con la concentración de PT en eventos de tormenta analizados (Steegeen et al., 2001), además se encontró una fuerte relación entre PT y la arcilla suspendida en el sedimento de las cuencas. La relación logarítmica entre CSS y PT también fue reportada por otros autores (ej. Schereiber y Rausch, 1979; Probst, 1985; Sharpley y Smith, 1991; Sharpley et al., 1991; Hodun y Burt, 1997).

En las micro cuencas agrícolas de Bélgica se usó la relación entre CSS y PT para estimar el PT exportado. En una micro cuenca de 250 ha y un periodo de observación de 30 meses, el P exportado fue de 3070 kg, correspondiente a 4.9 kg de PT ha⁻¹ año⁻¹ (Steegeen et al., 2001). Comparativamente, en una micro cuenca de 117 ha evaluada por un periodo de 18 meses el PT exportado fue de 224 kg, correspondiente a 1.3 kg de PT ha⁻¹ año⁻¹. Ambas cuencas estudiadas se situaron en condiciones similares de usos de terreno y fisiografía, sin embargo las diferencias (de 4 a 5 veces) en PT y sedimento exportado son explicadas por la variabilidad espacial de los procesos erosivos y las diferencias en duración de algunos eventos de precipitación (Nearing et al., 1999). El PT exportado varía fuertemente entre las cuencas. Sin embargo, a pesar de las diferencias en suelos, usos de terreno, hidrología y el tamaño de la cuenca, la proporción relativa a la que el contenido de P decrece con el incremento de CSS es más o menos constante (Steegeen et al., 2000).

Impacto de los usos de terreno en la descarga de nutrientes

Walling (1983) encontró que la erosión de la capa arable del suelo muestra un grado de enriquecimiento de nitrógeno orgánico. Por otro lado, Sharpley y Smith (1991) reportaron enriquecimiento con P proveniente de material erodado de fincas con agricultura intensiva. Esto ocurre como resultado del transporte selectivo de partículas de arcilla en la que el P está fuertemente adsorbido. De esta manera, cambios en los usos de terreno de una cuenca pueden ocasionar una alteración en el balance de nutrientes y descarga de sedimentos en dirección a los cuerpos de agua.

La organización espacial de los usos de terreno es un factor que puede explicar las diferencias en las tasas de sedimentos y exportación de nutrientes entre cuencas (Brodizio et al., 1994). Altas tasas de exportación de sedimentos suspendidos de las cuencas ocurren cuando hay una buena conexión entre la zona de erosión y el punto de cierre de la cuenca. Factores severos, como son la presencia de una carretera, presencia de cárcavas y cobertura vegetal pueden influir sobre esta conectividad (Beuselinck et al., 2000). Una cobertura densa de vegetación no solo previene la erosión, sino que también influencia en la deposición de sedimentos dentro de la cuenca y disminuye la aportación de sedimentos.

Índice de fósforo (IP)

El índice del fósforo es una herramienta que mide el riesgo potencial del transporte y el movimiento del fósforo hacia los cuerpos de agua. Los valores del IP identifican los sitios dónde el riesgo del movimiento de P es relativamente superior a otros (Lemunyon y Gilbert, 1993). El IP considera las características específicas de

campo y las prácticas de manejo para cuantificar el posible riesgo de transporte de P. No todas las características de campo y prácticas de manejo tienen la misma influencia. Algunos trabajos de investigación han mostrado que existen diferencias relativas en la importancia de cada una de las características del terreno y su manejo a la pérdida de P (USDA – NRCS, 2001).

El IP desarrollado para la zona del Caribe considera ocho parámetros característicos, tres de ellos son considerados como factores de transporte y los cinco restantes están relacionados con las prácticas de manejo. Los de transporte incluyen características como: (1) erosión del suelo, (2) clase de escorrentía y (3) distancia al cuerpo de agua y zona de amortiguamiento. Los parámetros considerados como fuente aportante incluyen: (4) contenido de P en el suelo, (5) nivel de aplicación de fertilizante inorgánico, (6) método y frecuencia de aplicación de fertilizante inorgánico, (7) nivel de aplicación de material orgánico y (8) método y frecuencia de aplicación de material orgánico. A cada uno de los parámetros mencionados se le ha asignado un valor que representa un peso numérico, los cuales se presentan en la tabla 1 (Castro et al., 2002).

Tabla 1. Peso asignado a los parámetros del índice de fósforo (IP) para la zona del caribe.

| Parámetros | Peso asignado |
|--|---------------|
| Erosión del suelo | 1.0 |
| Clase de escorrentía | 1.0 |
| Distancia al cuerpo de agua y zona de amortiguamiento | 1.0 |
| Contenido de P en el suelo | 1.0 |
| Nivel de aplicación de fertilizante inorgánico | 0.5 |
| Método y frecuencia de aplicación de fertilizante inorgánico | 0.5 |
| Nivel de aplicación de material orgánico | 0.75 |
| Método y frecuencia de aplicación de material orgánico | 1.0 |

A continuación se discutirán los parámetros que componen el IP desarrollado para la zona del Caribe.

Erosión de suelo: La erosión del suelo es el proceso de desprendimiento, transporte y deposición de suelo producido por la lluvia y la energía asociada al agua en movimiento. La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisado (RUSLE, siglas en inglés) se utiliza para estimar la erosión del suelo. El valor de esta categoría esta determinado en toneladas de suelo acre⁻¹ año⁻¹. La tasa es mayor cuando la erosión de suelo se incrementa. Este parámetro considera el riesgo de movimiento de los sedimentos suspendidos asociados con el P en el agua de escorrentía. La ecuación RUSLE para calcular la erosión de suelo, se deduce de la siguiente ecuación:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

Donde:

A es el promedio anual de pérdida de suelo (ton acre⁻¹ año⁻¹); **R** es el factor de clima; **K** es el factor de erodabilidad del suelo; **LS** es el factor topográfico, longitud e

inclinación de la pendiente del terreno; **C** es el factor de cobertura vegetal y manejo de la cobertura y **P** es el factor de prácticas de conservación del terreno.

Clase de escorrentía: La clase de escorrentía considera el riesgo relativo del transporte superficial de P de un sitio por el flujo de agua sobre la superficie del terreno hacia el cuerpo de agua. Esta agrupación está basada en la escorrentía producida según las características del suelo. La clase de escorrentía usada en este IP es una función de la pendiente del terreno y la permeabilidad del suelo que está directamente relacionada con la serie de suelo. Cada serie de suelo tiene una clase de escorrentía asignada y existe una base de datos que la describe. El método es adaptado del: National Soil Survey Handbook (USDA - NRCS, 1997). Las clases de escorrentía son:

N que indica insignificante; **VL** que indica muy baja; **L** que indica baja; **M** que indica medio; **H** que indica alta y **VH** que indica muy alta.

Distancia al cuerpo de agua y ancho de la franja de amortiguamiento: El factor “distancia al cuerpo de agua y ancho de la franja de amortiguamiento” considera la distancia (en pies) del sitio de aplicación de P hacia el cuerpo de agua y los efectos de filtro de la franja de vegetación de amortiguamiento. La superficie de agua incluye algunos canales permanentes, manantiales, lagos, humedales, zanjas o vías de agua con flujo intermitente a lo largo del año. La franja de amortiguamiento es considerado como el efecto de filtro de una vegetación para todas las áreas donde el agua fluye desde el campo, incluyendo pastizales bien manejados. Las franjas filtro, bordes de campo, franjas de contornos de amortiguamiento, barreras de pastos en las vías de agua y zonas de amortiguamiento por bosques, son ejemplos de amortiguamiento vegetal o coberturas.

Los valores de clasificación son establecidos basados en la distancia a la superficie del agua, ancho de franjas de amortiguamiento y la condición de manejo de la cobertura. El vigor de las plantas de vegetación permanente puede reducir o incrementar la velocidad de escorrentía e infiltración. En un ecosistema similar, un pastizal bien manejado puede tener una baja escorrentía y una mayor infiltración que una condición de pasto superficial. Sitios con distancias y anchos de amortiguamiento mayor o menor que el promedio especificado en el IP recibirá un valor alto o bajo, respectivamente. El efecto de amortiguamiento de las franjas de vegetación puede compensar la distancia al cuerpo de agua.

Contenido de P en el suelo (CPS): El factor “contenido de P en el suelo” es el nivel nutricional de P en el suelo, expresada en partes por millón (ppm). Desde un punto de vista ambiental la prueba de suelo para P debe ser entendida para predecir las cantidades de P que se pierden del suelo y que son llevadas hacia los cuerpos de agua. No se puede asumir que hay una relación directa entre el CPS y la contaminación potencial por el nutriente. Esto se debe a que el movimiento del P puede afectarse por las propiedades del suelo como el pH, contenido de arcillas, mineralogía, entre otros. Sin embargo, existe una relación cuantitativa entre la cantidad de P obtenida en la prueba de suelo y el P soluble en agua.

Nivel de aplicación de fertilizante inorgánico (NFI): El factor “nivel de aplicación de fertilizante inorgánico” corresponde a la cantidad de P expresado en libras acre⁻¹, que es aplicado en el suelo y dividido por la cantidad de P removido por el cultivo. Los montos aplicados no incluyen el P proveniente de fuentes orgánicas.

NFI = nivel de aplicación de P inorgánico anual / absorción de P por el cultivo

Método y frecuencia de aplicación de fertilizante inorgánico: El factor “método y frecuencia de aplicación de fertilizante inorgánico” considera si la fertilización con P es aplicada en la superficie del suelo, incorporada o irrigada. Esto también considera el tiempo que el fertilizante está expuesto en la superficie del suelo y el historial climático estacional donde ocurren las lluvias. La incorporación del fertilizante después de la aplicación reduce el potencial de P.

Nivel de aplicación de material orgánico (NMO): El factor “nivel de aplicación de material orgánico” es la proporción entre la aplicación al suelo de PT en estiércol, expresado en libras acre⁻¹ y la absorción por el cultivo. Es necesario un análisis del material orgánico para determinar el PT contenido en el estiércol. La mayor parte del total aplicado será relacionado sobre un periodo de tiempo dependiendo del tipo de suelo y de las condiciones climáticas.

NMO = nivel de aplicación de P orgánico anual/ absorción del cultivo.

Método y frecuencia de aplicación de material orgánico: El factor “método y frecuencia de aplicación de material orgánico” considera si el material orgánico con P es aplicado a la superficie, incorporado o irrigado y el tiempo que permanece expuesto el estiércol en la superficie del suelo y el historial climático estacional donde ocurren las lluvias. La incorporación del material después de la aplicación reduce el potencial de P.

El IP fue desarrollado para clasificar el riesgo relativo de ocurrencia y no puede ser interpretado como una garantía de la pérdida actual de P. La clasificación de un sitio

no refleja un estándar de calidad de agua. Esta es una herramienta que puede ser usada en la planificación de recursos para identificar sitios que pueden requerir esfuerzos de conservación para minimizar la transferencia de P hacia las superficies de agua.

III. LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO

Generalidades del área de estudio

Puerto Rico, como las otras islas de las Antillas Mayores, se formó en el Cretáceo como un arco de isla con deformaciones ocurridas en el Cretáceo tardío y en el Terciario temprano. El material geológico de este arco de isla forma el centro de la isla y esta compuesta por rocas volcánicas, epiplásticas y carbonatos menores los cuales han sido ligeramente metamorfozadas e intruídas por rocas ígneas, basálticas y plutónicas. En el Terciario medio superior, unidades carbonatadas y clásticas fueron depositadas en los flancos del centro de la isla (Dengo y Case, 1990).

El presente estudio se enfoca en la cuenca del Río Grande de Añasco la cual está localizada en el oeste de Puerto Rico, colindante con la bahía de Mayagüez. La litología en la cuenca consiste principalmente de andesita intemperizada, clásticos volcánicos y roca sedimentaria (Mattson, 1960).

Cuenca del Río Grande de Añasco

La cuenca del Río Grande de Añasco abarca parte del oeste de la isla incluyendo los municipios de Adjuntas, Lares, San Sebastián, Maricao, Las Marías, Mayagüez y Añasco (USGS, 1998). El Río Grande de Añasco nace cerca del Monte Guilarte a una elevación de 1,204 m y fluye hacia el oeste a lo largo de 74 km para descargar en la bahía de Mayagüez. La mayor parte de la cuenca se localiza en tierras de montaña con un área costera consistente en planicies bajas inundables. El área de drenaje de la cuenca es de 522.8 km² (52,278 ha) con rangos de elevación que van desde 0 a 930 metros en las montañas. Esto no incluye un área de 93.8 km² (9,380 ha) de la porción este de la cuenca

que fue desviada hacia la costa sur con propósitos de irrigación. Adicionalmente, 9 km² (900 ha) contribuyen a la parte baja de la cuenca sólo durante eventos de tormenta (Díaz y Jordan, 1987).

El uso de la tierra dentro de la región montañosa es mayormente forestal con algunas áreas agrícolas y sub urbanas y en las planicies inundables las condiciones están dominadas por la agricultura y pasturas con una mínima cobertura sub urbana y de tierras forestales.

Dentro de la mitad este de la cuenca, las pendientes del terreno tienen un promedio del 38% mientras que en la mitad oeste el promedio de las pendientes es ligeramente menor con 32%. Las pendientes en la zona inundable bajan a aproximadamente 3%. Cerca del canal mayor del Río Grande de Añasco las pendientes en promedio son de 16% y cerca de sus tributarios son de aproximadamente 23%.

El valle del Río Grande de Añasco es fundamentalmente formado por rocas ígneas del Terciario temprano y Cretáceo tardío. El relleno remanente del valle son rocas limosas intercaladas con arcillas (Díaz y Jordan, 1987). La textura que predomina en los suelos de la cuenca es arcilloso y arcillo-limoso. La profundidad de los suelos dentro de la cuenca tienen un rango de 0.4 a 1.5 metros con un lecho de roca de naturaleza sedimentaria o de origen volcánico (Gierbolini, 1975).

El clima en esta cuenca se caracteriza por ser cálido. El promedio diario de las temperaturas en el valle son de 22 a 26° C. Durante la época lluviosa (Mayo a Octubre) recurrentes chubascos de 10 a 20 minutos de duración con ocasionales tormentas de una a dos horas ocurren tres y cuatro veces semanales. Durante la época seca, son menos frecuentes los chubascos y usualmente ocurren en horas de la tarde. El área es también

afectada por el sistema climático general que ocurre en el resto de la isla y con ello usualmente se presentan los sistemas de baja presión que se mueven desde el Océano Atlántico con dirección al Caribe. Lluvias intensas de uno o dos días de duración algunas veces resultan de estos sistemas. La precipitación anual en las regiones de montaña exceden los 2,500 milímetros. (Díaz y Jordan, 1987).

Análisis con tamices revelan que aproximadamente 90% de los sedimentos suspendidos acarreados por el Río Grande de Añasco son tan finos como 0.062 milímetros (Díaz et al., 1993). Sin embargo, el flujo acarreado hacia la zona sur de la Bahía de Mayagüez ha causado depósitos de arena en la boca del Río Grande de Añasco. Esta barrera de arena usualmente se desarrolla durante la época seca y ha sido bien conocida por reducir la boca del río hasta 6 metros de ancho (Díaz y Jordan 1987).

Las micro cuencas de Miraflores y Cerro Gordo se encuentran ubicadas en la parte noroeste de la cuenca del Río Grande de Añasco (figura 2), el acceso a ambas es siguiendo la carretera estatal número 109, desde el municipio de Añasco a San Sebastián. La micro cuenca Miraflores se encuentra en el barrio del mismo nombre, comprende una extensión de 224 ha de las cuales más del 60% del área es dominado por una cobertura forestal de porte arbustivo. Un área importante de la micro cuenca está constituida por viviendas (11%) y alrededor de solo un 4% del área es desarrollada para actividades agrícolas en las que se aprecian cultivos incipientes de plátano cafeto y ñame. La micro cuenca Cerro Gordo se encuentra en el barrio de Corcobada, su área comprendida es de 714.7 ha, dentro de la cual se cuenta con diversos usos de terreno, las actividades agrícolas representan mas del 30% del área con dominancia de cultivos a nivel comercial de plátano, cafeto y ñame, principalmente.

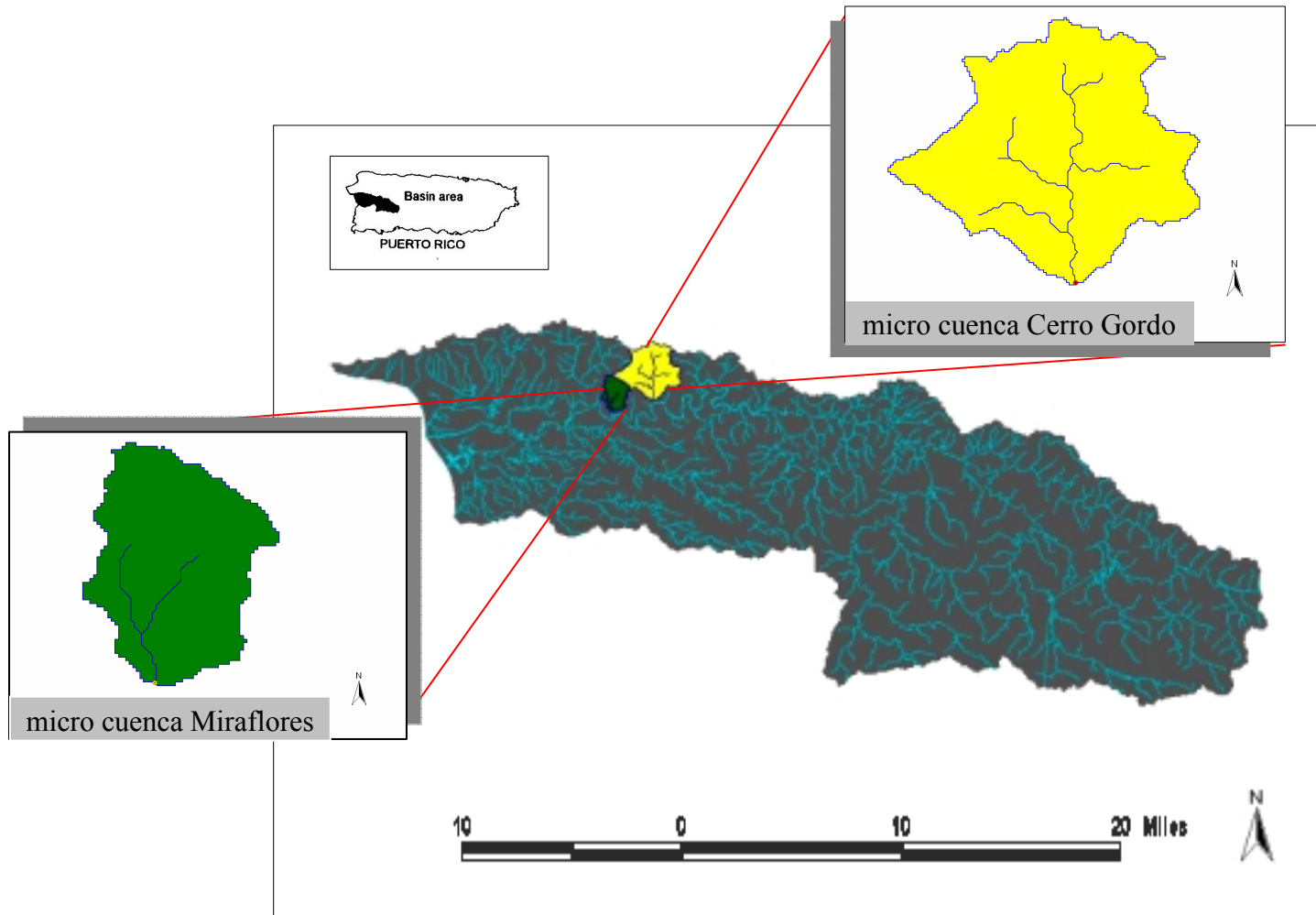


Figura 2. Mapa de ubicación de las micro cuencas, Miraflores y Cerro Gordo dentro del área de la cuenca de Añasco.

IV. METODOLOGIA

La metodología del presente estudio se dividió en cuatro partes generales que consistieron en: (1) desarrollo de un sistema de información geográfico (SIG); (2) monitoreo y análisis de los eventos de tormenta; (3) aplicación del índice de fósforo y (4) análisis estadístico, los cuales se describen a continuación.

Desarrollo del SIG para el área de estudio

La delimitación de las micro cuencas se basó en el uso del modelo de elevación digital (MED) generada por el USGS en formato Raster, a una escala de 1:24000, versión de agosto del 2001. Esta información fue geo-referenciada en UTM (Universal Transverse Mercator), zona 19, *North American Datum* 1927. Las distancias del MED están representadas en metros y su resolución es de 30 m x 30 m x 1 m en las coordenadas X, Y y Z, respectivamente. Las micro cuencas se encuentran localizadas en el cuadrángulo topográfico del USGS denominado Central la Plata. Para la definición de los límites, red de drenaje y puntos de cierre de las micro cuencas se utilizaron el MED y herramientas del programa Watershed Modeling System (WMS) v6.1 (EMS, Logan, Utah) (figura 3).

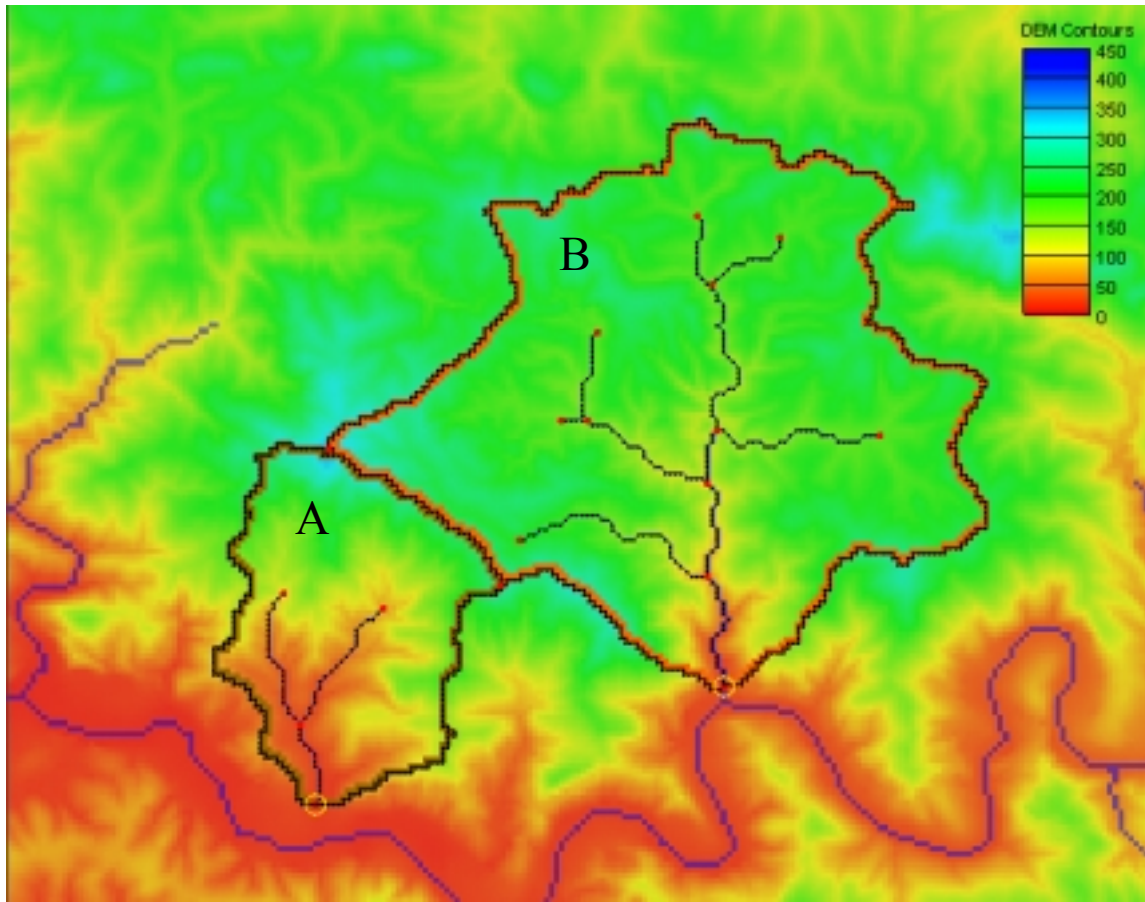


Figura 3. Modelo de elevación digital (en metros) en micro cuencas (A) Miraflores y (B) Cerro Gordo.

Las coberturas de uso de terreno se categorizaron usando fotografías digitales orto corregidas (DOQQ, siglas en inglés) en blanco y negro del USGS tomadas en octubre de 1997. La fotografía DOQQ correspondiente al cuadrángulo de Central la Plata, fue georeferenciada de la misma manera como se hizo con el MED, en UTM y zona 19 correspondiente a Puerto Rico. Los mapas de usos de terreno para las micro cuencas Miraflores y Cerro Gordo fueron generados inicialmente usando el programa WMS v6.1 para definir los polígonos y sus atributos correspondientes, posteriormente se exportaron al programa Arc View 3.2 (Environmental Systems Research Institute, 1996) donde se

calculó el área para cada polígono usando la herramienta “Xtools” y se generaron las coberturas finales. Para establecer la clasificación de usos de terreno, se agruparon los polígonos con iguales atributos y se usó el sistema de clasificación del USGS (Anderson et al., 1976). En base a la mencionada clasificación, se asignaron las siguientes categorías de usos de terreno: (1) agricultura (cultivos agrícolas); (2) bosque (bosques secundarios); (3) vegetación herbácea (vegetación de porte bajo); (4) pasturas (pasturas con fertilización/sin fertilización) y (5) urbano (urbano/sub urbano). Los polígonos y los atributos de clasificación asignados se validaron con un recorrido de campo que condujo a la obtención de los mapas actualizados de usos de terreno al mes de febrero del 2004 y definitivos para efectos del presente estudio (figuras 4 y 5).

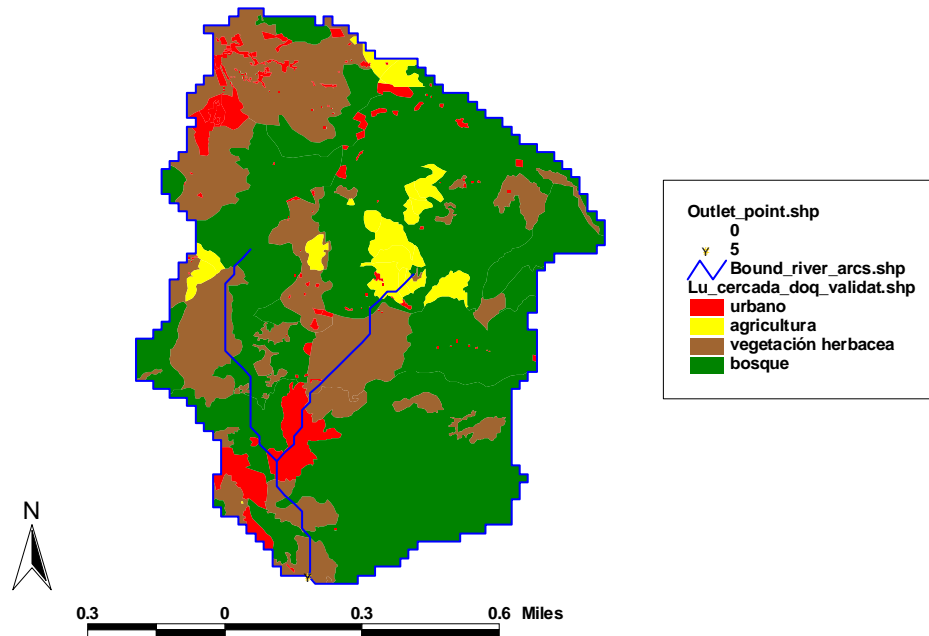


Figura 4. Mapa de uso de terreno en micro cuenca Miraflores.

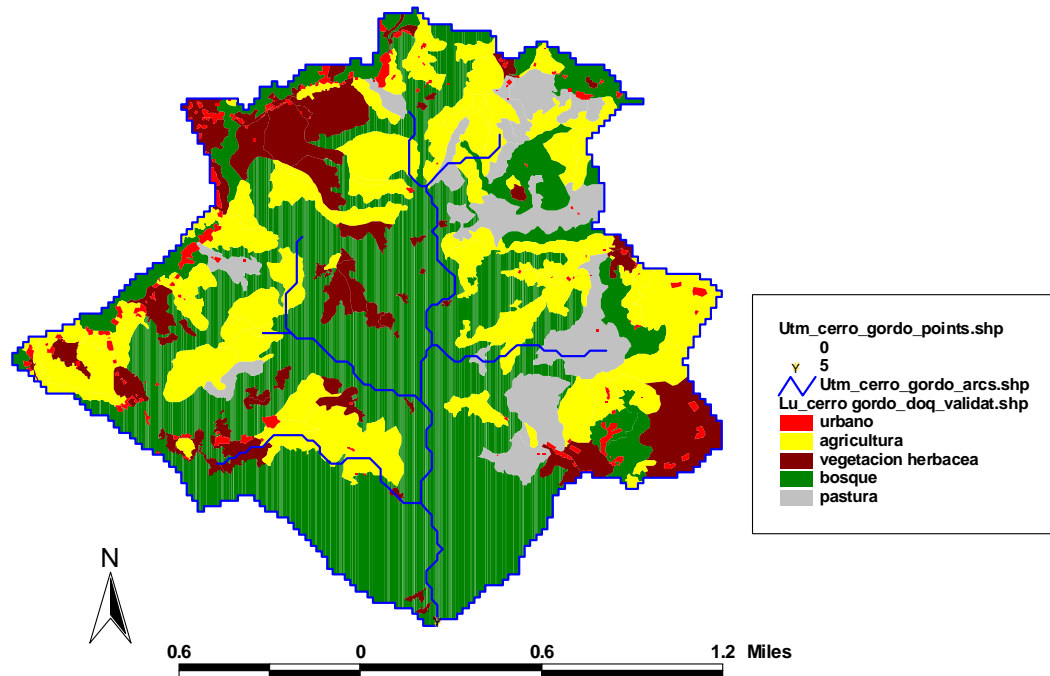


Figura 5. Mapa de uso de terreno en micro cuenca Cerro Gordo.

La descripción de los usos de terreno y sus respectivas áreas se presentan en la tabla 2 como producto de los mapas generados por el sistema de información geográfico. Los polígonos clasificados como “agricultura” incluyeron cultivos agrícolas de consumo humano, quedando al margen de esta clasificación las áreas identificadas con pasturas cultivadas y/o naturales. En la micro cuenca Miraflores solo un 3.9% del área total recibió esta clasificación, los cultivos predominantes son plátano (*Musa spp*), café (*Coffea arabica*) y ñame (*Discorea alata*). En la micro cuenca Cerro Gordo el 20.2% del área total esta dominada por una agricultura de tipo intensiva a nivel comercial, los

cultivos predominantes, en orden de importancia son: plátano, cafeto, ñame y cítricos (*Citrus sp*).

Los polígonos clasificados como bosque secundario y vegetación herbácea correspondieron a la vegetación de especies pioneras de porte mediano (hasta 10 m de altura) y porte bajo (hasta 3 m de altura), respectivamente. Resultado de la sucesión natural posterior a intervenciones antropogénicas o fenómenos naturales. En la micro cuenca Miraflores el 61.5% corresponde a bosque secundario y el 23.1% a vegetación herbácea. Similarmente, para Cerro Gordo, el 55.1% está representado por bosque secundario y el 13.5% por vegetación herbácea.

La clasificación de “pasto natural” correspondió a pasturas dominadas por *gramineas* que no reciben o recibieron aportaciones mínimas de fertilización orgánica e inorgánica. Esta clasificación de uso de terreno sólo se presentó en la micro cuenca Cerro Gordo. Se estimó que la cantidad de animales en pastoreo son menos de 50 animales (L. Nieves, comunicación personal, 2004).

Los polígonos clasificados como “urbano” correspondieron a la distribución de viviendas de tipo rural y su área de influencia, la delimitación de estos polígonos fue posible por la alta resolución de las fotografías DOQQ. Un factor común observado en esta clasificación fue la ausencia de un sistema de alcantarillado en ambas micro cuencas. En la micro cuenca Miraflores, la clasificación de urbano tiene una proporción del 11.5% del área total, correspondiendo a un estimado de 560 viviendas. En contraste, la micro cuenca Cerro Gordo tiene una proporción del 1.1% del área total y se estimó un aproximado de 776 viviendas.

Tabla 2. Distribución de usos de terreno y proporción de áreas en micro cuencas estudiadas.

| Tipo de uso de terreno | Miraflores | | Cerro Gordo | |
|------------------------|------------|------|-------------|------|
| | Area (ha) | (%) | Area (ha) | (%) |
| Agricultura | 8.6 | 3.9 | 144.6 | 20.2 |
| Bosque secundario | 137.8 | 61.5 | 393.5 | 55.1 |
| Vegetación herbácea | 51.7 | 23.1 | 96.3 | 13.5 |
| Pasto natural | 0.0 | 0.0 | 72.3 | 10.1 |
| Urbano | 25.8 | 11.5 | 8.0 | 1.1 |
| Total | 224.0 | 100 | 714.7 | 100 |

La información de suelos para las micro cuencas Miraflores y Cerro Gordo fueron obtenidas de la base de datos (SSURGO) del Departamento de Agricultura de lo Estados Unidos (USDA) en formato digital geo- referenciado en UTM. Usando las herramientas “Geo Processing Wizard” del programa Arc View 3.2 se interceptaron los polígonos de las series de suelos dentro de los límites de cada micro cuenca (figuras 6 y 7). La descripción para cada serie de suelos presentada en el estudio se encuentra en el Apéndice A (Gierbolini, 1975).

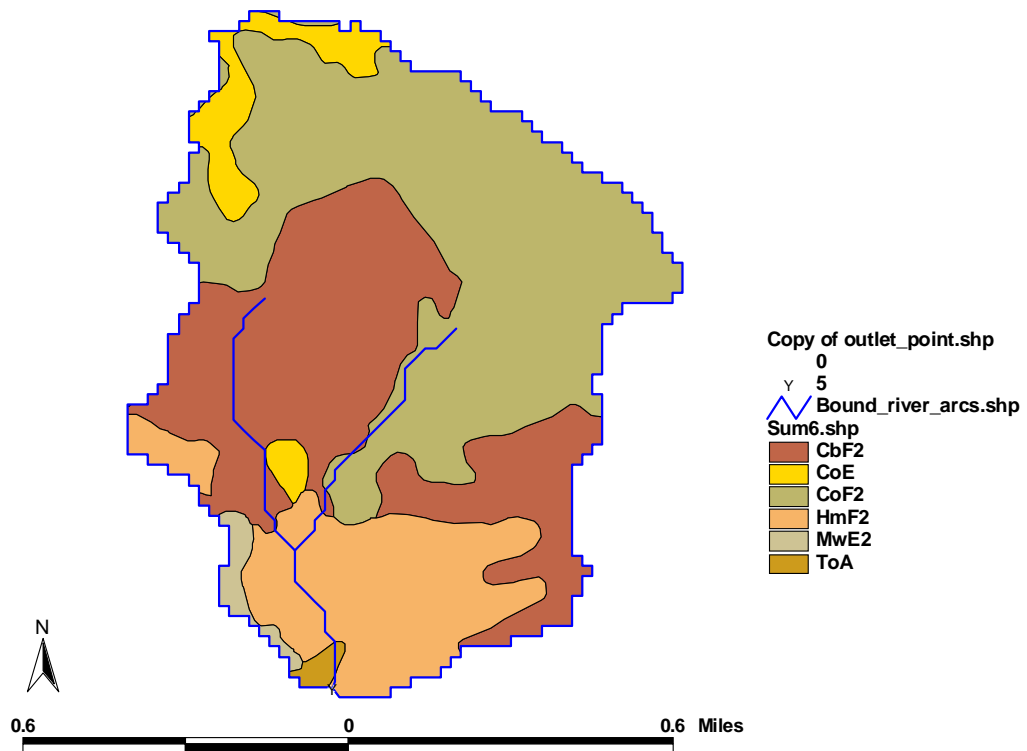


Figura 6. Mapa de suelos en micro cuenca Miraflores. Donde CbF2, CoE, CoF2, HmF2, MwE2 y ToA corresponden a las series Caguabo arcilloso lómico 20 a 60% de declive, Consumo arcilloso 20 a 40% de declive, Consumo arcilloso 40 a 60% de declive, Humatas arcilloso 40 a 60% de declive, Morado arcilloso lómico 20 a 40% de declive y Toa limo arcilloso lómico 0 a 2% de declive, respectivamente.

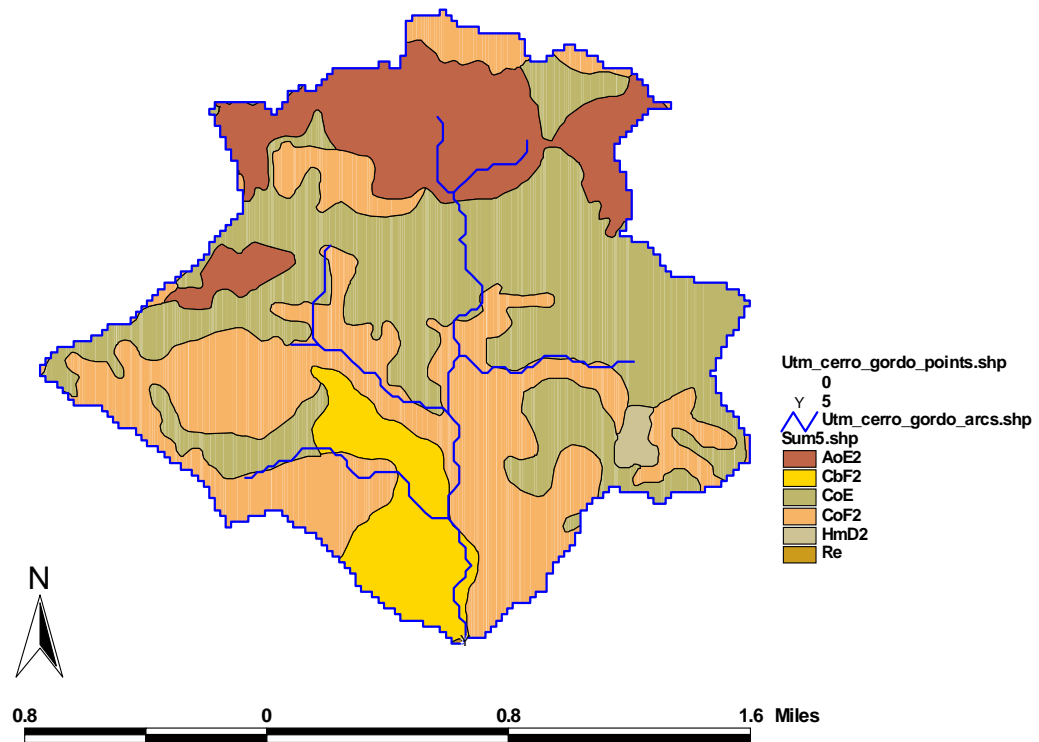


Figura 7. Mapa de suelos en micro cuenca Cerro Gordo. Donde AoE2, CbF2, CoE, CoF2, HmD2 y Re corresponden a las series Anones arcilloso lómico 20 a 60% de declive, Caguabo arcilloso lómico 20 a 60% de declive, Consumo arcilloso lómico 20 a 40% de declive, Consumo arcilloso 40 a 60% de declive, Humatas arcilloso 12 a 20% de declive y Reilly casajoso lómico, respectivamente.

Monitoreo y análisis de eventos de tormenta

El monitoreo de los eventos de tormenta para las micro cuencas Miraflores y Cerro Gordo se realizó desde el 23 de agosto del 2003 al 31 de agosto del 2004 y del 1 de octubre del 2003 al 31 de agosto del 2004, respectivamente. Sin embargo, dentro del periodo monitoreado, los eventos muestreados solo ocurrieron hasta julio del 2004. En los puntos de cierre de cada micro cuenca se instalaron estaciones equipadas con instrumentos ISCO® 3700 (ISCO Corp. Lincoln, NE) de muestreo automático (figura 8) para coleccionar muestras de agua de la escorrentía asociada con los eventos de tormenta. Adicionalmente en la estación de Miraflores se instaló un pluviómetro que registró la precipitación pluvial a partir del 1 de octubre del 2003.

El equipo de muestreo automático se mantuvo conectado a un sensor de presión ISCO® 4220 (figura 8) que registró la altura de ascenso y descenso del hidrograma de escorrentía dentro de cada evento de tormenta. El sensor de presión se ubicó a 0.30 m de altura con respecto al fondo del canal en el punto de cierre de cada una de las micro cuencas y registró continuamente los niveles de altura de la columna de agua para el periodo del estudio. Los equipos se programaron para tomar muestras compuestas en una botella (Nalgene Corp. Rochester, NY) de un volumen de 9 litros por evento, dividido en 15 sub muestras de 600 ml cada una. La programación de los niveles (altura de la columna de agua con respecto al fondo del canal) de inicio de muestreo se estableció inicialmente en forma visual, en Miraflores se consideró como evento de escorrentía a partir de una altura de 0.34 m (flujo de $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$) del nivel de la columna de agua y en Cerro Gordo a partir de una altura de 0.38 m ($0.10 \text{ m}^3/\text{s}$). Complementariamente,

Sotomayor-Ramírez et al. (2004) estimaron como condición de flujo base para las micro cuencas Miraflores y Cerro Gordo flujos de $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente.

La programación del intervalo de tiempo de muestreo y altura de inicio de muestreo fue variable ocasionalmente para ambas micro cuencas (tablas 3 y 4) debido a ajustes realizados en el transcurso de la investigación acordes con la temporada de precipitación pluvial y el flujo esperado.

Para estimar el flujo instantáneo se utilizó la curva de descarga en el punto de observación de Cerro Gordo y Miraflores (Figuras 11 y 12) generada por L. Pérez-Alegría (datos sin publicar, 2004), mediante modelación hidráulica, usando el programa HEC-RAS del Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System), del tramo del canal antes y después del punto de observación (Sotomayor-Ramírez et al., 2004). Basados en la curva de descarga se estimó el flujo instantáneo para cada altura medida por el equipo ISCO - 4220 dentro de cada evento de tormenta. El volumen hidrológico instantáneo se obtuvo mediante el producto del flujo instantáneo y el intervalo de tiempo. La sumatoria de estos volúmenes instantáneos se utilizó para obtener el volumen total por evento.



Figura 8. Equipos de muestreo: muestreador automático ISCO® 3700 (A) y sensor de presión ISCO® 4220 (B).

Tabla 3. Programación de equipos de muestreo y precipitación pluvial en micro cuenca Miraflores.

| Evento | Fecha de evento | Altura inicial de muestreo (m) | Flujo inicial (m ³ /s) | Tiempo entre muestras (minuto) | Sub muestras colectadas (unidad) | Precipitación asociada al evento (mm/día) |
|--------|-----------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---|
| 1 | 06-Set-03 | 0.34 | 0.02 | 4.0 | 7 | SD |
| 2 | 13-Set-03 | 0.34 | 0.02 | 4.0 | 15 | SD |
| 3 | 23-Set-03 | 0.34 | 0.02 | 4.0 | 6 | SD |
| 4 | 26-Set-03 | 0.34 | 0.02 | 4.0 | 6 | SD |
| 5 | 10-Oct-03 | 0.34 | 0.02 | 4.0 | 5 | 21.30 |
| 6 | 16-Oct-03 | 0.34 | 0.02 | 4.0 | 15 | 22.10 |
| 7 | 17-Oct-03 | 0.34 | 0.02 | 4.0 | 15 | 33.00 |
| 8 | 26-Oct-03 | 0.34 | 0.02 | 4.0 | 15 | 6.40 |
| 9 | 29-Oct-03 | 0.34 | 0.02 | 4.0 | 15 | 2.80 |
| 10 | 31-Oct-03 | 0.34 | 0.02 | 4.0 | 15 | 43.20 |
| 11 | 03-Nov-03 | 0.34 | 0.02 | 4.0 | 15 | 22.90 |
| 12 | 10-Nov-03 | 0.34 | 0.02 | 4.0 | 15 | 2.00 |
| 13 | 18-Nov-03 | 0.34 | 0.02 | 4.0 | 10 | 10.90 |
| 14 | 22-Nov-03 | 0.34 | 0.02 | 8.0 | 12 | 12.70 |
| 15 | 26-Nov-03 | 0.34 | 0.02 | 8.0 | 9 | 6.40 |
| 16 | 07-Dic-03 | 0.34 | 0.02 | 8.0 | 8 | 29.00 |
| 17 | 14-Dic-03 | 0.34 | 0.02 | 8.0 | 9 | 25.40 |
| 18 | 12-May-04 | 0.46 | 0.34 | 8.0 | 15 | 54.40 |
| 19 | 14-May-04 | 0.46 | 0.34 | 8.0 | 15 | 38.10 |
| 20 | 29-May-04 | 0.46 | 0.34 | 8.0 | 15 | 38.60 |
| 21 | 23-Jun-04 | 0.46 | 0.34 | 8.0 | 4 | 7.90 |
| 22 | 30-Jun-04 | 0.46 | 0.34 | 8.0 | 4 | 18.50 |
| 23 | 03-Jul-04 | 0.46 | 0.34 | 8.0 | 14 | 16.30 |

SD = Dato sin coleccionar.

Tabla 4. Programación de equipos de muestreo y precipitación pluvial en micro cuenca Cerro Gordo.

| Evento | Fecha de evento | Altura inicial de muestreo (m) | Flujo inicial (m ³ /s) | Tiempo entre muestras (minutos) | Sub muestras colectadas (unidad) | Precipitación asociada al evento (mm/día) |
|--------|-----------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---|
| 1 | 20-Oct-03 | 0.38 | 0.10 | 8.0 | 13 | 2.00 |
| 2* | 24-Oct-03 | 0.38 | 0.10 | 8.0 | 15 | 16.50 |
| 3 | 25-Oct-03 | 0.38 | 0.10 | 12.0 | 15 | 31.50 |
| 4 | 26-Oct-03 | 0.38 | 0.10 | 12.0 | 14 | 6.40 |
| 5 | 01-Nov-03 | 0.38 | 0.10 | 12.0 | 15 | 6.60 |
| 6* | 12-Nov-03 | 0.38 | 0.10 | 12.0 | 15 | 2.30 |
| 7** | 13-Nov-03 | 1.98 | 130.00 | 12.0 | 15 | 68.60 |
| 8* | 15-Nov-03 | 0.55 | 0.24 | 12.0 | 15 | 20.30 |
| 9* | 18-Nov-03 | 0.55 | 0.24 | 12.0 | 15 | 10.90 |
| 10* | 07-Dic-03 | 0.38 | 0.10 | 12.0 | 15 | 29.00 |
| 11 | 14-Dic-03 | 0.38 | 0.10 | 12.0 | 4 | 25.40 |
| 12* | 08-May-04 | 0.46 | 0.15 | 20.0 | 15 | 50.80 |
| 13 | 12-May-04 | 0.46 | 0.15 | 20.0 | 6 | 54.40 |
| 14* | 14-May-04 | 0.46 | 0.15 | 20.0 | 9 | 38.10 |
| 15 | 19-May-04 | 0.46 | 0.15 | 20.0 | 4 | 49.50 |
| 16 | 10-Jun-04 | 0.46 | 0.15 | 20.0 | 4 | 10.20 |
| 17 | 26-Jun-04 | 0.46 | 0.15 | 8.0 | 15 | 30.50 |
| 18 | 01-Jul-04 | 0.46 | 0.15 | 8.0 | 8 | 15.00 |
| 19 | 02-Jul-04 | 0.46 | 0.15 | 8.0 | 10 | 20.30 |
| 20 | 11-Jul-04 | 0.46 | 0.15 | 8.0 | 6 | 26.40 |
| 21 | 15-Jul-04 | 0.46 | 0.15 | 8.0 | 7 | 30.50 |
| 22 | 20-Jul-04 | 0.46 | 0.15 | 8.0 | 15 | 30.50 |
| 23* | 23-Jul-04 | 0.46 | 0.15 | 8.0 | 15 | 9.10 |

* Muestreo incompleto, solo cubrió ascenso y pico de escorrentía.

** Muestreo solo cubrió pico escorrentía y descenso de escorrentía.

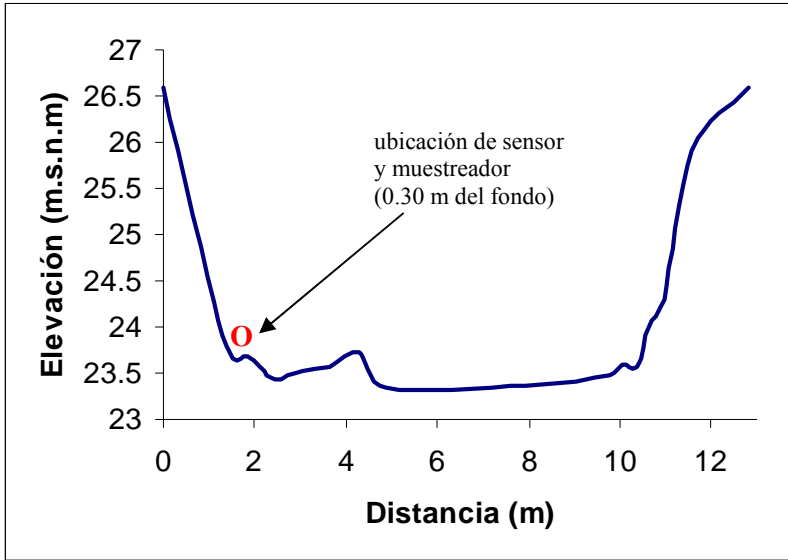


Figura 9. Sección transversal del punto de muestreo en micro cuenca Miraflores.

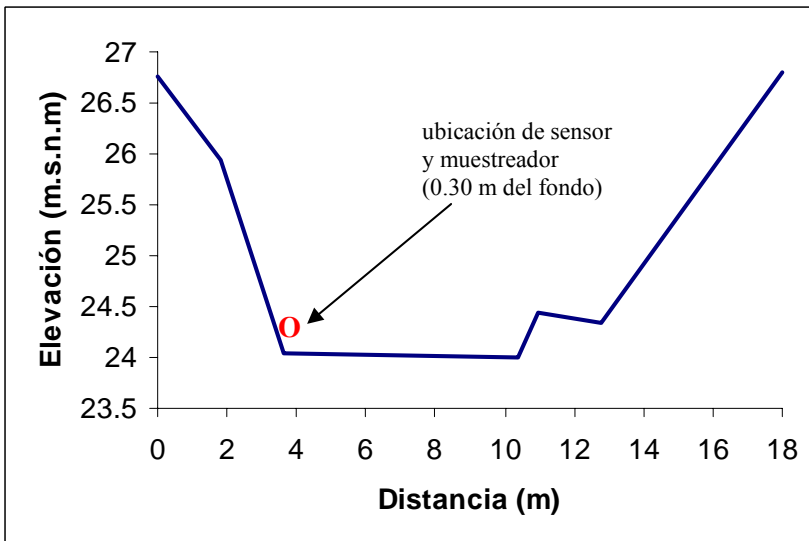


Figura 10. Sección transversal del punto de muestreo en micro cuenca Cerro Gordo.

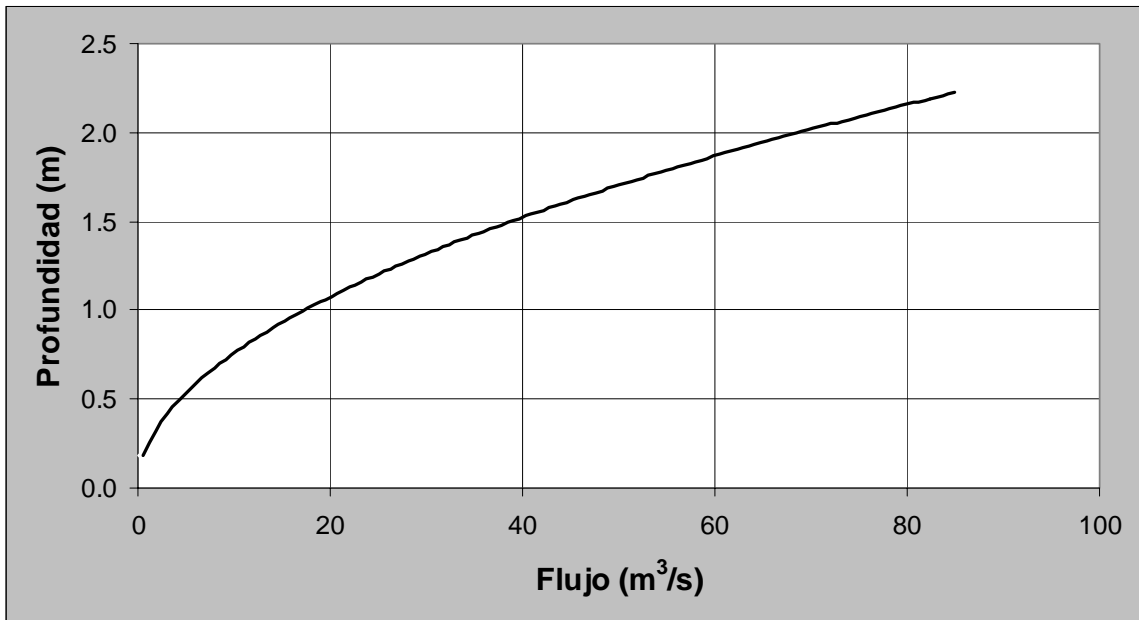


Figura 11. Curva de descarga para la micro cuenca Miraflores.

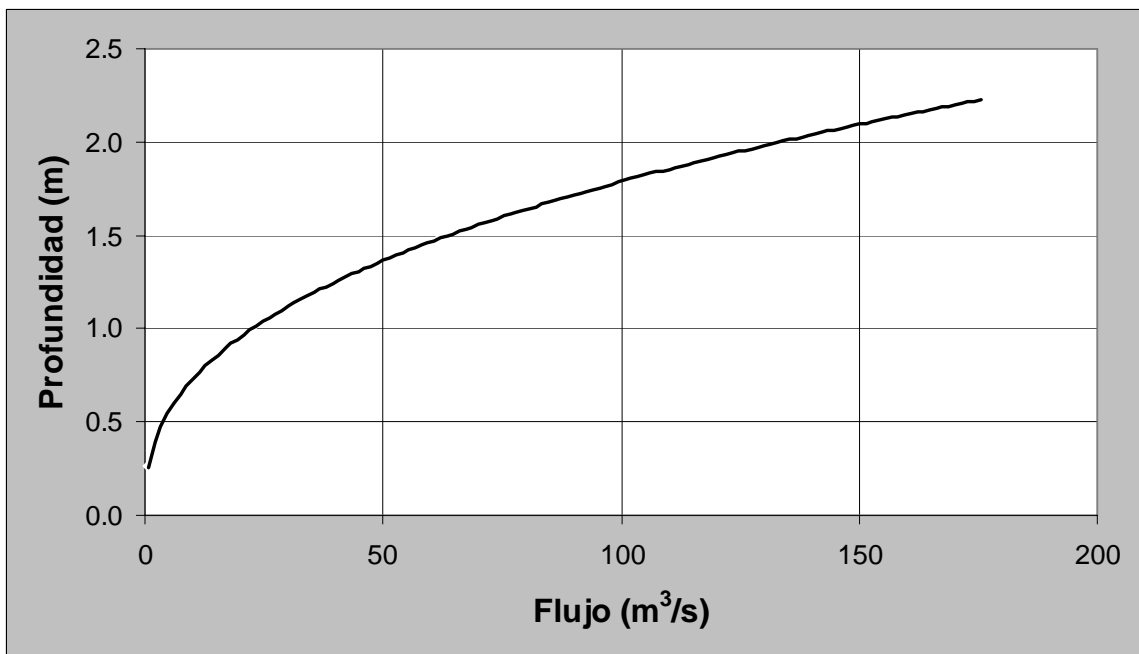


Figura 12. Curva de descarga para la micro cuenca Cerro Gordo.

Las muestras de agua de escorrentía colectadas en campo fueron analizadas en el laboratorio de Agronomía y Suelos de la Universidad de Puerto Rico - Mayagüez y el laboratorio de Suelos y Aguas de la Estación Experimental Agrícola de Río Piedras. Para el caso de sedimentos o residuos no filtrados se utilizó el método N° 160.2 que consiste en la filtración al vacío usando filtros de fibra de vidrio Watman GF/F, recomendado por la EPA (USEPA, 1999). Los análisis de nutrientes se hicieron siguiendo los protocolos recomendados por EPA: para TKN se uso el método 351.2; para PT y PD se uso el método N° 355.2 (USEPA, 1999). Las muestras obtenidas en campo fueron procesadas dentro de las 24 horas de colectadas para el caso de SS y congeladas para su posterior análisis en el caso de NTK, PT y PD.

Los flujos estimados y las concentraciones de SS, TKN, PT y PD permitieron calcular las cargas totales durante los eventos de tormenta. La carga en un intervalo de tiempo determinado es el producto de las concentraciones de SS, TKN, PT y PD con el flujo integrado en el tiempo para el evento de tormenta. En eventos donde el muestreo no cubrió el periodo completo de la tormenta, los cálculos de carga cubrieron solamente el intervalo muestreado.

$$\text{Carga}_{\text{SS,TKN,PT,PD}} = C \int_{\text{tiempo}} Q_i dt$$

Donde:

C es la concentración de SS, TKN, PT, PD en cada evento muestreado (kg/m^3); **Q_i** es el flujo estimado instantáneo (m^3/s) y **dt** es el cambio en tiempo entre cada intervalo de medición durante el evento de tormenta (s).

Aplicación del IP

La metodología del IP se aplicó a un total de cinco parcelas agrícolas, dos se situaron en el ámbito de la micro cuenca Miraflores y las tres restantes en la micro cuenca Cerro Gordo. El criterio de selección de las parcelas se basó en la representatividad de los cultivos y el tipo de manejo predominantes a nivel de cada micro cuenca. El procedimiento para la determinación del IP se inició con mediciones de campo como: pendiente del terreno, distancia de la parcela al cuerpo de agua, porcentaje de cobertura de la vegetación circundante al cuerpo de agua (franja de amortiguamiento). El segundo paso fue la recolección de muestras de suelo para su posterior análisis del contenido de P (Olsen y Sommers, 1982) realizados en laboratorio. Se entrevistaron a los operadores de las parcelas para obtener información sobre cantidades de fertilizante aplicado, métodos de aplicación y rotación de cultivos. Finalmente, se efectuaron cálculos para determinar la clase de escorrentía por parcela usando la ecuación RUSLE de acuerdo a cada serie de suelos (USDA - NRCS, 2002) y se aplicó la ecuación que determina el nivel de vulnerabilidad de cada parcela en la pérdida de P, la cual se describe a continuación:

$$IP = ((SE \times C1) \times (RC \times C2) \times (PSW \times C3)) \times \sum (SC \times Ci)$$

Donde:

SE es el nivel de erosión de suelo; **C1** es el peso del coeficiente de erosión del suelo; **RC** es la clase de escorrentía; **C2** es el peso del coeficiente de la clase de escorrentía; **PSW** es la distancia al cuerpo de agua/nivel de franja de amortiguamiento; **C3** es el peso del coeficiente para distancia al cuerpo de agua/ franja de amortiguamiento; **SC** es el nivel asignado según características de la fuente, que son: contenido de P en el

suelo, nivel de aplicación de fertilizante inorgánico, método y frecuencia de aplicación de fertilizante inorgánico, nivel de aplicación de material orgánico, método y frecuencia de aplicación de material orgánico y C_i es el peso del coeficiente para cada característica de la fuente.

Análisis estadístico

Para comparar los resultados entre concentraciones de nutrientes, sedimentos y flujo de los eventos de tormenta monitoreados en las dos micro cuencas se aplicó la prueba de T para muestras individuales con un nivel de significancia $P < 0.05$. Se realizaron análisis de correlación entre las variables estudiadas usando el procedimiento “Proc CORR” del programa estadístico SAS (SAS, Institute, NC). Finalmente, se desarrollaron modelos matemáticos usando la técnica de regresión lineal para comparar los coeficientes de determinación (r^2) entre las variables: flujo (variable independiente) versus SS, carga de SS, NTK, carga de NTK, PT, carga de PT, PD y carga de PD (variables dependientes) con los datos transformados a \log_{10} ; así como carga de SS (variable independiente) versus carga de NTK y carga de PT (variables independientes). Las relaciones con sus interceptos fueron organizadas en grupos de variables dependientes e independientes y fueron separadas en modelos de regresión lineal.

V. RESULTADOS Y DISCUSION

Concentración de nutrientes y sedimentos suspendidos

En las tablas 5 y 6 se muestran las concentraciones de SS, PT, PD y NTK durante 23 eventos de tormenta muestreados para las micro cuencas Miraflores y Cerro Gordo. Los hidrogramas de los eventos durante el periodo de muestreo están presentados en los Apéndices B y C, respectivamente. En todos los eventos monitoreados en Miraflores se consiguió con éxito capturar el ascenso, pico y descenso de la escorrentía. El tiempo programado de muestreo varió entre 60 y 120 minutos. En Cerro Gordo, de los 23 eventos monitoreados, 14 fueron cubiertos desde el ascenso, pico y descenso de la escorrentía; en 8 eventos sólo se capturó el ascenso y pico de escorrentía y en 1 evento se muestreó el pico y parte del descenso de escorrentía. El tiempo programado de muestreo varió entre 120, 180 y 300 minutos. Cabe señalar que en ningún caso se produjo mezcla de muestras de diferentes eventos.

En la tabla 7 se presentan los valores promedios de volumen cumulativo por evento, concentraciones de SS, PT PD y NTK. Estos valores indican que las concentraciones de SS, PT y NTK durante los eventos de tormenta fueron altas para ambas micro cuencas comparadas con muestreos manuales reportados por Sotomayor et al. (2004) que cubrieron un periodo de muestreo de mayo del 2002 a diciembre del 2003 (tabla 8). En contraste a los patrones de flujo durante los muestreos manuales, fuertes gradientes de incremento de nutrientes se desarrollaron en eventos de tormenta.

Se ha sugerido que el límite umbral de PT que promueve la eutrofización es de 0.1 mg L^{-1} (USEPA, 1986; Daniel et al., 1998). En Miraflores el 70% de los episodios

muestreados superaron la concentración de 0.1 mg L^{-1} y la media fue de 0.34 mg L^{-1} . En Cerro Gordo el 74% de los episodios muestreados excedieron la concentración sugerida y la media resultante fue de 0.48 mg L^{-1} . Los valores promedios de parámetros como el flujo, concentración de SS y PD tuvieron diferencias estadísticamente significativas entre la micro cuenca Miraflores y Cerro Gordo. En contraste, las medias de las concentraciones de nutrientes como PT y NTK no tuvieron una diferencia estadísticamente significativa entre micro cuencas. Estos resultados no reflejan directamente las diferencias proporcionales en usos de terreno, pero confirman que los nutrientes provienen de fuentes dispersas de contaminación como son las viviendas rurales sin alcantarillado y pequeños animales asociados a las viviendas principalmente en el caso de Miraflores y la agricultura intensiva con aplicación de fertilizantes inorgánicos como fuente principal en el caso de Cerro Gordo.

Las concentraciones de elementos disueltos y particulados en eventos de tormenta son dependientes de muchos factores que controlan la movilización y transporte de los elementos hacia el canal durante los eventos de tormenta. Esos factores incluyen cantidades de precipitación, intensidad y duración, velocidad del flujo en el canal, cantidades de partículas solubles e insolubles de la superficie del terreno de las micro cuencas y características de usos de terreno. Debido al gran número de variables potenciales e independientes y las interrelaciones complejas entre esas variables no fue posible relacionar cuantitativamente las concentraciones de nutrientes y sedimentos suspendidos con los usos de terreno de cada micro cuenca que son de uso de terreno mixto.

En la tabla 9 se presentan los valores promedios de concentraciones de SS, PT, PD y NTK que compara los eventos de tormenta muestreados completamente con los eventos incompletos en la micro cuenca Cerro Gordo. Los resultados reflejan que las medias de PT y NTK en los eventos muestreados completamente son significativamente mayores que los eventos de muestreo incompleto. Steegen et al. (2000) en su estudio en una cuenca agrícola de Bélgica, determinó que variaciones en flujo y concentración de nutrientes son dinámicas en el tiempo y dentro de cada evento observado. Basados en los resultados, se puede inferir la ocurrencia de un fenómeno de las altas concentraciones de nutrientes asociados con las partículas transportadas en el inicio de la tormenta con subsecuentes declinaciones en las concentraciones, que son comúnmente referidas como un "primer flujo- rápido". Este fenómeno representa el transporte de elementos solubles y en forma de partículas desde la superficie del terreno como flujo superficial y una posterior redisolución de elementos conforme transcurre la tormenta. En un estudio en la cuenca del Río Grande de Arecibo, Díaz et al. (2003) reportaron un aumento en el contenido de arcilla y arena en las partes ascendentes del hidrograma de los eventos de tormenta.

Tabla 5. Concentración de sedimentos suspendidos (SS), fósforo total (PT), fósforo disuelto (PD) y nitrógeno total Kjeldhal (NTK) durante eventos de tormenta en micro cuenca Miraflores.

| Evento | Fecha | Volumen/evento | SS | PT | PD | TKN |
|--------|-----------|---------------------------|-------------------------------|------|------|------|
| | | -----m ³ ----- | -----mg L ⁻¹ ----- | | | |
| 1 | 06-Set-03 | 8.82x10 ³ | 1725.44 | 0.11 | 0.08 | 2.72 |
| 2 | 13-Set-03 | 2.04x10 ⁴ | 1903.33 | 0.08 | 0.05 | 3.82 |
| 3 | 23-Set-03 | 3.90x10 ³ | 624.83 | 0.11 | 0.06 | 2.23 |
| 4 | 26-Set-03 | 3.68x10 ³ | 674.33 | 0.11 | 0.05 | 2.95 |
| 5 | 10-Oct-03 | 2.73x10 ³ | 486.40 | 0.07 | 0.06 | 1.41 |
| 6 | 16-Oct-03 | 2.01x10 ⁴ | 3908.50 | 0.06 | 0.04 | 4.67 |
| 7 | 17-Oct-03 | 4.68x10 ⁴ | 5065.33 | 0.04 | 0.01 | 7.08 |
| 8 | 26-Oct-03 | 1.12x10 ⁴ | 806.33 | 0.06 | 0.07 | 2.28 |
| 9 | 29-Oct-03 | 1.05x10 ⁴ | 517.50 | 0.27 | 0.07 | 0.31 |
| 10 | 31-Oct-03 | 2.13x10 ⁴ | 2013.00 | 0.52 | 0.08 | 0.73 |
| 11 | 03-Nov-03 | 1.57x10 ⁴ | 1074.00 | 0.43 | 0.06 | 0.49 |
| 12 | 10-Nov-03 | 1.13x10 ⁴ | 554.67 | 0.05 | 0.03 | 0.19 |
| 13 | 18-Nov-03 | 6.20x10 ³ | 593.67 | 0.34 | 0.04 | 0.59 |
| 14 | 22-Nov-03 | 2.75x10 ⁴ | 629.00 | 0.49 | 0.06 | 0.54 |
| 15 | 26-Nov-03 | 1.36x10 ⁴ | 523.33 | 0.41 | 0.07 | 0.43 |
| 16 | 07-Dic-03 | 1.26x10 ⁴ | 1860.33 | 0.32 | 0.07 | 0.24 |
| 17 | 14-Dic-03 | 1.53x10 ⁴ | 835.17 | 0.69 | 0.06 | 0.40 |
| 18 | 12-May-04 | 1.10x10 ⁵ | 5626.00 | 2.26 | 0.05 | 0.83 |
| 19 | 14-May-04 | 3.22x10 ⁴ | 801.33 | 0.44 | 0.09 | 0.58 |
| 20 | 29-May-04 | 3.41x10 ⁴ | 1330.25 | 0.38 | 0.11 | 1.94 |
| 21 | 23-Jun-04 | 5.55x10 ³ | 1339.67 | 0.36 | 0.07 | 2.35 |
| 22 | 30-Jun-04 | 5.70x10 ³ | 842.25 | 0.26 | 0.06 | 1.91 |
| 23 | 03-Jul-04 | 4.89x10 ⁴ | 1959.50 | 0.04 | 0.10 | 0.46 |

Tabla 6. Concentración de sedimentos suspendidos (SS), fósforo total (PT), fósforo disuelto (PD) y nitrógeno total Kjeldhal (NTK) durante eventos de tormenta en micro cuenca Cerro Gordo.

| Evento | Fecha | Volumen/evento | SS | PT | PD | TKN |
|--------|-----------|-------------------------|-------------------------------|------|-------|-------|
| | | ----m ³ ---- | -----mg L ⁻¹ ----- | | | |
| 1 | 20-Oct-03 | 1.99x10 ⁴ | 401.50 | 0.05 | 0.01 | 1.43 |
| 2* | 24-Oct-03 | 4.15x10 ⁴ | 752.83 | 0.04 | 0.03 | 1.88 |
| 3 | 25-Oct-03 | 6.06x10 ⁴ | 1806.00 | 0.02 | 0.01 | 5.17 |
| 4 | 26-Oct-03 | 5.55x10 ⁴ | 1762.33 | 0.03 | 0.01 | 4.23 |
| 5 | 01-Nov-03 | 2.65x10 ⁵ | 2995.50 | 0.07 | 0.01 | 0.25 |
| 6* | 12-Nov-03 | 9.93x10 ⁴ | 1939.00 | 0.21 | 0.11 | 0.36 |
| 7** | 13-Nov-03 | 1.19x10 ⁶ | 3527.92 | 0.24 | 0.01 | 0.37 |
| 8* | 15-Nov-03 | 1.05x10 ⁵ | 1927.50 | 0.25 | 0.02 | 0.14 |
| 9* | 18-Nov-03 | 1.38x10 ⁶ | 3891.40 | 0.61 | 0.01 | 0.39 |
| 10* | 07-Dic-03 | 1.93x10 ⁵ | 2142.83 | 0.70 | 0.01 | 0.51 |
| 11 | 14-Dic-03 | 6.12x10 ³ | 498.83 | 0.25 | 0.08 | 0.34 |
| 12* | 08-May-04 | 1.09x10 ⁶ | 3890.00 | 0.13 | 0.07 | 0.71 |
| 13 | 12-May-04 | 2.93x10 ⁴ | 501.53 | 0.99 | 0.01 | 0.70 |
| 14* | 14-May-04 | 7.03x10 ⁴ | 1299.67 | 0.30 | 0.02 | 0.38 |
| 15 | 19-May-04 | 1.74x10 ⁴ | 472.67 | 0.59 | 0.01 | 0.38 |
| 16 | 10-Jun-04 | 1.42x10 ⁴ | 2489.67 | 0.37 | 0.01 | 4.65 |
| 17 | 26-Jun-03 | 1.53x10 ⁵ | 10310.67 | 1.47 | 0.01 | 13.86 |
| 18 | 01-Jul-03 | 1.26x10 ⁴ | 3383.67 | 0.94 | 0.01 | 4.94 |
| 19 | 02-Jul-03 | 2.70x10 ⁴ | 4524.75 | 1.24 | 0.003 | 7.57 |
| 20 | 11-Jul-03 | 7.74x10 ³ | 2816.50 | 0.69 | 0.01 | 4.22 |
| 21 | 15-Jul-03 | 1.07x10 ⁴ | 3242.25 | 0.86 | 0.04 | 5.76 |
| 22 | 20-Jul-03 | 6.60x10 ⁴ | 4100.60 | 0.94 | 0.02 | 13.89 |
| 23* | 23-Jul-03 | 1.77x10 ⁵ | 4292.06 | 0.08 | 0.03 | 0.25 |

* Muestreo del hidrograma fue incompleto, solo cubrió el ascenso y pico de escorrentía.

** Muestreo del hidrograma fue incompleto, solo cubrió el pico de escorrentía y descenso de escorrentía.

Tabla 7. Valores promedios y significancia estadística de parámetros físicos y químicos en micro cuencas estudiadas.

| Variable | Miraflores | Cerro Gordo | Valor T | <i>P</i> | Interpretación |
|---------------------------|----------------------|----------------------|---------|----------|----------------|
| Volumen (m ³) | 2.12x10 ⁴ | 2.21x10 ⁵ | -2.37 | 0.03 | D |
| SS (mg L ⁻¹) | 1551.9 | 2737.8 | -2.22 | 0.03 | D |
| PT (mg L ⁻¹) | 0.34 | 0.48 | -1.05 | 0.30 | ND |
| PD (mg L ⁻¹) | 0.06 | 0.02 | 5.32 | 0.01 | D |
| NTK (mg L ⁻¹) | 1.70 | 3.15 | -1.57 | 0.13 | ND |

SS= sedimentos suspendidos; PT= fósforo total; PD= fósforo disuelto; NTK= nitrógeno total Kjeldahl.

D = diferencia significativa entre medias ($P < 0.05$).

ND= no hay diferencia significativa entre medias ($P > 0.05$).

Tabla 8. Valores promedios de las concentraciones de parámetros físicos y químicos obtenidos en muestreos manuales de Mayo del 2002 a Diciembre del 2003 en micro cuencas estudiadas.

| Micro cuenca | Flujo | SS | PT | PD | NTK |
|--------------|-----------------------------|-------------------------------|------|------|------|
| | -----m ³ /s----- | -----mg L ⁻¹ ----- | | | |
| Miraflores | 0.05 | 3.57 | 0.06 | 0.05 | 0.09 |
| Cerro Gordo | 0.21 | 20.50 | 0.06 | 0.04 | 0.12 |

SS= sedimentos suspendidos; PT= fósforo total; PD= fósforo disuelto; NTK= nitrógeno total Kjeldahl.

Tabla 9. Valores promedio y significancia estadística de parámetros físicos y químicos en micro cuenca Cerro Gordo, separado por eventos de tormenta muestreados completamente versus muestreos incompletos (ascenso y pico de escorrentía).

| Variable | Eventos completos | Eventos incompletos | Valor T | P | Interpretación |
|---------------------------|-------------------|---------------------|---------|-------|----------------|
| SS (mg L ⁻¹) | 3043.15 | 2387.79 | 0.78 | 0.45 | ND |
| PT (mg L ⁻¹) | 0.61 | 0.28 | 2.16 | 0.04 | D |
| PD (mg L ⁻¹) | 0.02 | 0.03 | -1.54 | 0.14 | ND |
| NTK (mg L ⁻¹) | 4.81 | 0.55 | 3.51 | 0.004 | D |

SS= sedimentos suspendidos; PT= fósforo total; PD= fósforo disuelto; NTK= nitrógeno total Kjeldahl.

D = diferencia significativa entre medias ($P < 0.05$).

ND= no hay diferencia significativa entre medias ($P > 0.05$).

Cuantificación de carga de nutrientes y sedimentos suspendidos

Durante las tormentas, las aportaciones de SS, PT, PD y NTK, son el resultado de las contribuciones del flujo base y el flujo adicional asociado a las tormentas. Los datos colectados durante cada tormenta y en cada sitio fueron usados para calcular la carga total de esos elementos como se especificó en la metodología.

En las tablas 10 y 11 se aprecian las cargas unitarias por evento de tormenta individual. Las cargas totales cuantificadas en 23 eventos de tormenta por micro cuenca, indican que los valores para SS, PT, PD y NTK fueron 14, 5.5, 4.5 y 7.2 veces más, respectivamente, en la micro cuenca Cerro Gordo que en Miraflores.

En la tabla 12 se presenta el resultado de las descargas (kg/área de drenaje) que es la masa del sedimento o nutriente transportado por el río en los eventos de tormenta, dividida por el área de drenaje de la micro cuenca en el punto de cierre. El cálculo de descarga es un método para normalizar la carga estimada y facilitar las comparaciones

entre las micro cuencas que son de diferentes tamaños. Similarmente con lo observado entre las cargas de SS y nutrientes, los valores de descarga para SS, PT, PD y NTK fueron 4.5, 1.7, 1.5 y 2.3 veces más, respectivamente en la micro cuenca Cerro Gordo que en Miraflores. Estas diferencias son explicadas por la variabilidad espacial de los procesos erosivos y las diferencias en magnitud de algunos eventos de precipitación pese a que ambas micro cuencas son situadas en condiciones similares de fisiografía y suelos, pero contrastantes en usos de terreno.

En la micro cuenca Miraflores, los eventos número 7 y 18 presentaron los mayores volúmenes por evento comparado con los 21 eventos restantes. En el evento número 7, que se capturó luego de un día con respecto al evento anterior (evento número 6), el volumen fue de $4.68 \times 10^4 \text{ m}^3$ y las concentraciones de SS, PT, PD y NTK fueron de 5065, 0.04, 0.01 y 7.08 mg L^{-1} , respectivamente. En el evento número 18, el volumen fue de $1.10 \times 10^5 \text{ m}^3$ y las concentraciones de SS, PT, PD y NTK fueron de 5626, 2.26, 0.05 y 0.83 mg L^{-1} , respectivamente. Comparando ambos eventos, se pueden resaltar que el evento número 18 tuvo valores más altos en términos de volumen y concentraciones de SS, PT y PD, estos fueron de 2.35, 1.11, 56.5 y 5 veces más, respectivamente. Contrariamente, la concentración de NTK fue 8.53 veces menos que en el evento número 7. La concentración de NTK del evento número 7 y la concentración de PT del evento número 18 fueron las más altas de todo el periodo muestreado y las cargas representaron el 39% y 72% de la carga total, respectivamente. En base a esta observación se puede inferir, que las cargas que fueron determinantes en la cuantificación final de la micro cuenca Miraflores en NTK y PT estuvieron asociadas a las altas concentraciones ocurridas en los mayores eventos de tormenta muestreados en el presente estudio.

Las mayores concentraciones de NTK y de PT de los eventos monitoreados en la micro cuenca Miraflores, pudo deberse a un efecto de intensidad y distribución de precipitación dentro de la micro cuenca. Sin embargo, es posible observar que la concentración más alta de NTK del periodo estudiado se presentó en un evento que estuvo separado por menos de dos días con respecto al evento anterior y la mayor concentración de PT, correspondió al mayor volumen de precipitación (54.4 mm) dentro de los eventos monitoreados en la micro cuenca Miraflores.

En la micro cuenca Cerro Gordo, los eventos número 7, 9, 12 y 17 presentaron los mayores valores de carga estimada en PT y NTK. Los eventos señalados representaron el 79 y 63% de la carga total estimada para la micro cuenca, lo cual se debió principalmente a la magnitud de volúmenes de agua asociados a las tormentas y en menor grado a las concentraciones, excepto para el evento número 17 donde se registraron las concentraciones más altas del periodo que abarco la investigación, siendo 1.47 y 13.86 mg L⁻¹ de PT y NTK, respectivamente.

Ramos-Guínés (1997) cuantificó la entrada de nutrientes al lago Cidra (Puerto Rico) provenientes de cinco micro cuencas. El autor reportó que las descargas anuales de PT en dos de las micro cuencas con uso predominantemente agrícola fueron 1.49 kg ha⁻¹ y 1.98 kg ha⁻¹, respectivamente. Las descargas de N total para las mismas micro cuencas fueron 6.91 kg ha⁻¹ y 8.59 kg ha⁻¹. Sotomayor-Ramírez et al. (2004) reportaron descargas anuales de PT para las micro cuencas Miraflores y Cerro Gordo de 0.66 kg ha⁻¹ y 1.51 kg ha⁻¹, respectivamente, y de NTK para las mismas micro cuencas fueron 7.12 kg ha⁻¹ y 4.10 kg ha⁻¹, respectivamente. Comparando esos valores con los determinados en el presente estudio se observa que las descargas de PT y NTK son sustancialmente altas si

consideramos que la cuantificación es sólo para eventos de tormenta. La descarga de PT en los de tormenta de las micro cuencas Miraflores y Cerro Gordo fueron 1.54 kg ha^{-1} y 2.67 kg ha^{-1} , respectivamente. Las descargas de NTK para las mismas micro cuencas fueron 3.85 kg ha^{-1} y 8.65 kg ha^{-1} , respectivamente. La diferencia radica en que la cuantificación de descargas del presente estudio se basó en la estimación de flujos instantáneos ocurridos durante cada tormenta, sin considerar el flujo previo o posterior a la tormenta. Los estudios anteriormente mencionados estiman las descargas de nutrientes basados en flujos promedios diarios estratificados en condiciones de flujo base y condiciones de flujo de tormenta. Pocos estudios han reportado los patrones de cambio en flujos y concentraciones de nutrientes a escala de micro cuenca específicamente durante eventos de tormenta.

La mayor parte del PT transportado por el flujo superficial en cuencas con variado uso de terreno es en forma particulada (definida como la diferencia entre PT y PD). Sharpley et al. (1999) reportó que más del 90% del PT exportado por el flujo superficial fue en forma particulada. Correll et al. (1999) determinó que las concentraciones de nutrientes particulados transportados desde la superficie del suelo a los cuerpos de agua fueron importantes en los incrementos de N total y PT durante eventos de tormenta. Los autores reportaron las cargas de PT y PD en eventos de tormenta, demostrando que el P particulado fue en promedio el 83% de la carga total de P. Similarmente a los estudios mencionados, en las micro cuencas Miraflores y Cerro Gordo se encontró que el 92% y 93% respectivamente de la carga de PT estuvieron asociadas con el P particulado. Consecuentemente, la mayor parte del P que llegó a los cuerpos de agua fue proveniente de las partículas transportadas (erosión) durante los eventos de tormenta.

Tabla 10. Carga de sedimentos suspendidos (SS), fósforo total (PT), fósforo disuelto (PD) y nitrógeno total Kjeldhal (NTK) durante eventos de tormenta en micro cuenca Miraflores.

| Evento | Fecha | Volumen/evento | SS | PT | PD | TKN |
|--------|-----------|---------------------------|----------------------|--------|------|--------|
| | | -----m ³ ----- | -----kg----- | | | |
| 1 | 06-Set-03 | 8.82x10 ³ | 1.52x10 ⁴ | 0.96 | 0.69 | 24.01 |
| 2 | 13-Set-03 | 2.04x10 ⁴ | 3.88x10 ⁴ | 1.53 | 0.92 | 77.81 |
| 3 | 23-Set-03 | 3.90x10 ³ | 2.44x10 ³ | 0.42 | 0.24 | 8.70 |
| 4 | 26-Set-03 | 3.68x10 ³ | 2.49x10 ³ | 0.41 | 0.18 | 10.87 |
| 5 | 10-Oct-03 | 2.73x10 ³ | 1.33x10 ³ | 0.20 | 0.17 | 3.84 |
| 6 | 16-Oct-03 | 2.01x10 ⁴ | 7.88x10 ⁴ | 1.19 | 0.71 | 94.13 |
| 7 | 17-Oct-03 | 4.68x10 ⁴ | 2.37x10 ⁵ | 1.87 | 0.47 | 331.57 |
| 8 | 26-Oct-03 | 1.12x10 ⁴ | 9.05x10 ³ | 0.70 | 0.73 | 25.59 |
| 9 | 29-Oct-03 | 1.05x10 ⁴ | 5.42x10 ³ | 2.81 | 0.73 | 3.25 |
| 10 | 31-Oct-03 | 2.13x10 ⁴ | 4.29x10 ⁴ | 11.16 | 1.66 | 15.55 |
| 11 | 03-Nov-03 | 1.57x10 ⁴ | 1.69x10 ⁴ | 6.80 | 0.94 | 7.72 |
| 12 | 10-Nov-03 | 1.13x10 ⁴ | 6.28x10 ³ | 0.54 | 0.33 | 2.15 |
| 13 | 18-Nov-03 | 6.20x10 ³ | 3.68x10 ³ | 2.08 | 0.26 | 3.66 |
| 14 | 22-Nov-03 | 2.75x10 ⁴ | 1.73x10 ⁴ | 13.39 | 1.76 | 14.85 |
| 15 | 26-Nov-03 | 1.36x10 ⁴ | 7.13x10 ³ | 5.53 | 0.90 | 5.86 |
| 16 | 07-Dic-03 | 1.26x10 ⁴ | 2.35x10 ⁴ | 4.02 | 0.85 | 3.03 |
| 17 | 14-Dic-03 | 1.53x10 ⁴ | 1.28x10 ⁴ | 10.60 | 0.98 | 6.11 |
| 18 | 12-May-04 | 1.10x10 ⁵ | 6.20x10 ⁵ | 249.19 | 5.07 | 91.47 |
| 19 | 14-May-04 | 3.22x10 ⁴ | 2.58x10 ⁴ | 14.25 | 2.77 | 18.69 |
| 20 | 29-May-04 | 3.41x10 ⁴ | 4.54x10 ⁴ | 12.97 | 3.72 | 66.23 |
| 21 | 23-Jun-04 | 5.55x10 ³ | 7.44x10 ³ | 2.00 | 0.41 | 13.06 |
| 22 | 30-Jun-04 | 5.70x10 ³ | 4.81x10 ³ | 1.48 | 0.34 | 10.90 |
| 23 | 03-Jul-04 | 4.89x10 ⁴ | 9.58x10 ⁴ | 1.96 | 4.74 | 22.50 |

Tabla 11. Carga de sedimentos suspendidos (SS), fósforo total (PT), fósforo disuelto (PD) y nitrógeno total Kjeldhal (NTK) durante eventos de tormenta en micro cuenca Cerro Gordo.

| Evento | Fecha | Volumen/evento | SS | PT | PD | TKN |
|--------|-----------|---------------------------|----------------------|--------|-------|---------|
| | | -----m ³ ----- | -----kg----- | | | |
| 1 | 20-Oct-03 | 1.99x10 ⁴ | 7.98x10 ³ | 0.89 | 0.28 | 28.42 |
| 2 | 24-Oct-03 | 4.15x10 ⁴ | 3.13x10 ⁴ | 1.58 | 1.41 | 78.15 |
| 3 | 25-Oct-03 | 6.06x10 ⁴ | 1.09x10 ⁵ | 1.33 | 0.42 | 313.30 |
| 4 | 26-Oct-03 | 5.55x10 ⁴ | 9.78x10 ⁴ | 1.78 | 0.50 | 234.77 |
| 5 | 01-Nov-03 | 2.65x10 ⁵ | 7.95x10 ⁵ | 18.58 | 3.72 | 66.37 |
| 6 | 12-Nov-03 | 9.93x10 ⁴ | 1.93x10 ⁵ | 20.36 | 11.12 | 35.76 |
| 7 | 13-Nov-03 | 1.19x10 ⁶ | 4.22x10 ⁶ | 285.55 | 16.73 | 442.07 |
| 8 | 15-Nov-03 | 1.05x10 ⁵ | 2.02x10 ⁵ | 26.45 | 2.31 | 14.70 |
| 9 | 18-Nov-03 | 1.38x10 ⁶ | 5.36x10 ⁶ | 844.95 | 8.26 | 536.69 |
| 10 | 07-Dic-03 | 1.93x10 ⁵ | 4.14x10 ⁵ | 135.79 | 2.51 | 98.51 |
| 11 | 14-Dic-03 | 6.12x10 ³ | 3.06x10 ³ | 1.51 | 0.46 | 2.08 |
| 12 | 08-May-04 | 1.09x10 ⁶ | 4.24x10 ⁶ | 144.99 | 74.13 | 773.99 |
| 13 | 12-May-04 | 2.93x10 ⁴ | 1.47x10 ⁴ | 28.85 | 0.35 | 20.50 |
| 14 | 14-May-04 | 7.03x10 ⁴ | 9.15x10 ⁴ | 21.32 | 1.55 | 26.74 |
| 15 | 19-May-04 | 1.74x10 ⁴ | 8.24x10 ³ | 10.29 | 0.12 | 6.63 |
| 16 | 10-Jun-04 | 1.42x10 ⁴ | 3.53x10 ⁴ | 5.24 | 0.17 | 65.86 |
| 17 | 26-Jun-03 | 1.53x10 ⁵ | 1.58x10 ⁶ | 224.84 | 0.92 | 2119.91 |
| 18 | 01-Jul-03 | 1.26x10 ⁴ | 4.26x10 ⁴ | 11.84 | 0.09 | 62.23 |
| 19 | 02-Jul-03 | 2.70x10 ⁴ | 1.22x10 ⁵ | 33.52 | 0.08 | 204.61 |
| 20 | 11-Jul-03 | 7.74x10 ³ | 2.18x10 ⁴ | 5.34 | 0.05 | 32.66 |
| 21 | 15-Jul-03 | 1.07x10 ⁴ | 3.46x10 ⁴ | 9.19 | 0.41 | 61.52 |
| 22 | 20-Jul-03 | 6.60x10 ⁴ | 5.99x10 ⁵ | 62.11 | 1.32 | 917.84 |
| 23 | 23-Jul-03 | 1.77x10 ⁵ | 5.74x10 ⁵ | 14.14 | 5.48 | 44.19 |

Tabla 12. Descarga total estimada de sedimentos suspendidos, nutrientes y volumen de agua asociados a eventos de tormenta para micro cuencas estudiadas.

| Parámetros | Miraflores | | Cerro Gordo | |
|------------|----------------------|---------------------------------|----------------------|---------------------------------|
| | Carga (kg) | Descarga (kg ha ⁻¹) | Carga (kg) | Descarga (kg ha ⁻¹) |
| SS | 1.32x10 ⁶ | 5895 | 1.88x10 ⁷ | 26274 |
| PT | 346.1 | 1.54 | 1910.4 | 2.67 |
| PD | 29.6 | 0.13 | 132.4 | 0.19 |
| NTK | 861.6 | 3.85 | 6187.5 | 8.65 |

Análisis de correlación

El análisis de correlación se realizó basado en la posible influencia que tiene el flujo sobre la concentración y cargas de sedimentos suspendidos y nutrientes en eventos de tormenta. En el análisis de correlación de Pearson para la micro cuenca Miraflores (tabla 13) se encontró un coeficiente de correlación significativo entre el flujo y la concentración de SS, lo cual contrasta con lo encontrado para las concentraciones de PT, PD y NTK, las cuales no fueron significativas. Sin embargo, para la misma micro cuenca, las correlaciones entre el flujo y cargas de SS, PT, PD y NTK fueron estadísticamente significativas. Adicionalmente se observó correlaciones significativas entre la carga de SS y la carga de nutrientes totales (PT y NTK).

Para la micro cuenca Cerro Gordo se realizó el mismo análisis de correlación (tabla 14). No se encontraron coeficientes de correlación entre el flujo y las concentraciones de SS y nutrientes. Pero al igual que en la micro cuenca Miraflores, los coeficientes que correlacionaron al flujo con las cargas de SS, PT, PD y NTK y las cargas de SS con cargas de PT y NTK tuvieron significancia estadística.

En la tabla 15 se presentan las ecuaciones de regresión lineal que relacionan al volumen (variable independiente) con los parámetros físicos y químicos (variables dependientes) para ambas micro cuencas y combinación entre ambas. Los coeficientes de determinación (r^2) fueron altos en términos de cargas de SS, PT, PD y NTK para las micro cuenca Miraflores y Cerro Gordo en los eventos de tormenta. Esos coeficientes indican que del 85 al 87% de las variaciones en la correlación de las cargas de SS, del 54 al 56% de las variaciones en PT, el 76% de las variaciones del PD y del 36 al 39% de las variaciones de NTK están explicadas para la variación en los volúmenes de los eventos de tormenta muestreados. Se requeriría mayor cantidad de datos para determinar qué otros factores pueden estar afectando estas relaciones con el volumen durante eventos de tormenta. Este resultado sugiere que los modelos de regresión generados en este estudio tienen una importante aplicación a escala de cuenca si se considera la integración entre las concentraciones y los volúmenes hidrológicos.

En la tabla 16 se presentan las ecuaciones de regresión lineal que relacionan la carga de SS con las cargas de PT y NTK. Los coeficientes de determinación para las cargas de PT ($r^2= 0.41$; $r^2= 0.64$) y NTK ($r^2=0.58$; $r^2=0.59$) son similares en las micro cuencas Miraflores y Cerro Gordo respectivamente.

Tabla 13. Coeficientes de correlación de Pearson para parámetros físicos y químicos en micro cuenca Miraflores. Sólo se incluyeron los coeficientes con $P < 0.05$.

| Parámetro | Volmen/evento | Sedimentos suspendidos (mg L ⁻¹) |
|--|---------------|--|
| Sedimentos suspendidos (mg L ⁻¹) | 0.76 | ----- |
| Carga de sedimentos suspendidos (kg) | 0.93 | ----- |
| P total (mg L ⁻¹) | NS | 0.46 |
| Carga de P total (kg) | 0.85 | 0.60 |
| P disuelto (mg L ⁻¹) | NS | NS |
| Carga de P disuelto (kg) | 0.83 | NS |
| N total Kjeldahl (mg L ⁻¹) | NS | 0.53 |
| Carga de N total Kjeldahl (kg) | 0.46 | 0.76 |

NS = No significativo.

Tabla 14. Coeficientes de correlación de Pearson para parámetros físicos y químicos en micro cuenca Cerro Gordo. Sólo se incluyeron los coeficientes con $P < 0.05$.

| Parámetro | Volmen/evento | Sedimentos suspendidos (mg L ⁻¹) |
|--|---------------|--|
| Sedimentos suspendidos (mg L ⁻¹) | NS | ----- |
| Carga de sedimentos suspendidos (kg) | 0.99 | ----- |
| P total (mg L ⁻¹) | NS | 0.56 |
| Carga de P total (kg) | 0.81 | 0.35 |
| P disuelto (mg L ⁻¹) | NS | NS |
| Carga de P disuelto (kg) | 0.63 | NS |
| N total Kjeldahl (mg L ⁻¹) | NS | 0.66 |
| Carga de N total Kjeldahl (kg) | 0.29 | 0.84 |

NS = No significativo.

Tabla 15. Ecuaciones de regresión lineal entre el volumen (variable independiente)¹ versus parámetros físicos y químicos (variables dependientes)² en micro cuencas Miraflores, Cerro Gordo y ambas combinadas. Sólo se incluyeron ecuaciones con coeficientes $P < 0.05$.

| Parámetro | Micro cuenca | Ecuación | r ² |
|-----------|------------------|--------------------------|----------------|
| SS | Miraflores | SS = 0.5302 V + 0.8631 | 0.44 |
| | Cerro Gordo | NA | 0.21 |
| | Ambas combinadas | NA | 0.33 |
| CSS | Miraflores | CSS = 1.5302 V - 2.1366 | 0.87 |
| | Cerro Gordo | CSS = 1.2433 V - 0.8526 | 0.85 |
| | Ambas combinadas | CSS = 1.335 V - 1.3103 | 0.89 |
| PT | Miraflores | NA | 0.26 |
| | Cerro Gordo | NA | 0.04 |
| | Ambas combinadas | NA | 0.002 |
| CPT | Miraflores | CPT = 1.291 V - 4.9111 | 0.56 |
| | Cerro Gordo | CPT = 0.8733 V - 2.9613 | 0.54 |
| | Ambas combinadas | CPT = 1.011 V - 3.7069 | 0.64 |
| PD | Miraflores | NA | 0.003 |
| | Cerro Gordo | NA | 0.002 |
| | Ambas combinadas | NA | 0.11 |
| CPD | Miraflores | CPD = 0.937 V - 3.9867 | 0.76 |
| | Cerro Gordo | CPD = 1.0407 V - 5.0031 | 0.76 |
| | Ambas combinadas | CPD = 0.7834 V - 3.5579 | 0.62 |
| NTK | Miraflores | NA | 0.002 |
| | Cerro Gordo | NA | 0.04 |
| | Ambas combinadas | NA | 0.05 |
| CNTK | Miraflores | CNTK = 0.8778 V - 2.4671 | 0.39 |
| | Cerro Gordo | CNTK = 0.6342 V - 1.1348 | 0.36 |
| | Ambas combinadas | CNTK = 0.8103 V - 2.0846 | 0.50 |

1 V = volumen (m³).

2 SS= sedimentos suspendidos (mg L⁻¹); CSS= carga sedimentos suspendidos (kg); PT= P total (mg L⁻¹); CPT= carga P total (kg); PD= P disuelto (mg L⁻¹); CPD= carga P disuelto (kg); NTK= N total Kjeldahl (mg L⁻¹); CNTK= carga N total Kjeldahl (kg).
NA= no aplicable.

Tabla 16. Ecuaciones de regresión lineal entre carga de sedimentos suspendidos (variable independiente)¹ versus cargas de parámetros químicos (variables dependientes)² en micro cuencas Miraflores, Cerro Gordo y ambas combinadas. Sólo se incluyeron ecuaciones con coeficientes $P < 0.05$.

| Parámetros | Micro cuenca | Ecuación | r^2 |
|------------|------------------|---------------------------------|-------|
| CPT | Miraflores | $CPT = 0.6698 C_{ss} - 2.3765$ | 0.41 |
| | Cerro Gordo | $CPT = 0.7078 C_{ss} - 2.3906$ | 0.64 |
| | Ambas combinadas | $CPT = 0.7179 C_{ss} - 2.5265$ | 0.64 |
| CNTK | Miraflores | $CNTK = 0.6546 C_{ss} - 1.5826$ | 0.58 |
| | Cerro Gordo | $CNTK = 0.606 C_{ss} - 1.1918$ | 0.59 |
| | Ambas combinadas | $CNTK = 0.6766 C_{ss} - 1.6104$ | 0.69 |

- 1 CSS = carga de sedimentos suspendidos (kg).
- 2 CPT= carga de PT (kg); CNTK= carga de NTK (kg).
NA = no aplicable.

Indice de P

En las tablas 17 y 18 se presentan los resultados de la aplicación del índice de P a 2 parcelas en la micro cuenca Miraflores y 3 parcelas en Cerro Gordo. En base a esta herramienta que no refleja directamente los estándares de calidad de agua, sino que sirve para evaluar el nivel de riesgo de contaminación con P a una escala de parcela. Se encontró en las parcelas evaluadas dentro del ámbito de la micro cuenca Miraflores un **bajo** (≤ 2.7) potencial de movimiento de P de los terrenos agrícolas hacia el cuerpo de agua. En el ámbito de la micro cuenca Cerro Gordo se encontró en una de las parcelas evaluadas un potencial de movimiento de P **medio** ($2.7 \leq IP \leq 5.5$) hacia el cuerpo de agua.

De todos los parámetros considerados en esta metodología desarrollada para la zona del Caribe; la erosión de suelos, clase de escorrentía (factores de transporte), nivel de aplicación de fertilizante inorgánico, método y frecuencia de aplicación de fertilizante

inorgánico (fuente aportante) recibieron un valor asignado mayor que los parámetros restantes. Los parámetros como contenido de P en el suelo, nivel de aplicación de material orgánico, método y frecuencia de aplicación de material orgánico recibieron el valor mínimo asignado (0.1). Esto se debió principalmente a que las pruebas de suelo para P (método de Olsen y Bray) determinadas en laboratorio para todas las parcelas evaluadas tuvieron valores inferiores a 10 ppm consideradas en la metodología como “muy bajos” y respecto a la aplicación de material orgánico como fertilizante, ninguna de las parcelas considera este tipo de fertilización.

Tabla 17. Índices de P en predios evaluados dentro del área de influencia de micro cuenca Miraflores.

| Parámetro | Peso del parámetro | Parcela 1 | Parcela 2 |
|--------------------------|--------------------|--------------|--------------|
| -----Valor asignado----- | | | |
| SE | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| RC | 1.0 | 0.9 | 0.9 |
| PSW | 1.0 | 0.8 | 0.7 |
| CPS | 1.0 | 0.1 | 0.1 |
| NFI | 0.5 | 2.0 | 2.0 |
| MFI | 0.5 | 1.0 | 1.0 |
| NMO | 0.75 | 0.1 | 0.1 |
| MFO | 1.0 | 0.1 | 0.1 |
| Índice de P | | 2.16 | 1.89 |

SE = erosión del suelo; RC = clase de escorrentía; PSW = distancia al cuerpo de agua y zona de amortiguamiento; CPS = contenido de P en el suelo; NFI = nivel de aplicación de fertilizante inorgánico; MFI = método y frecuencia de aplicación de fertilizante inorgánico; NMO = nivel de aplicación de material orgánico; MFO = método y frecuencia de aplicación de material orgánico.

Tabla 18. Índices de P en predios evaluados dentro del área de influencia de micro cuenca Cerro Gordo.

| Parámetro | Peso del parámetro | Parcela 1 | Parcela 2 | Parcela 3 |
|--------------------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|
| -----Valor asignado----- | | | | |
| SE | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| RC | 1.0 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| PSW | 1.0 | 0.8 | 0.7 | 1.0 |
| CPS | 1.0 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| NFI | 0.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 |
| MFI | 0.5 | 2.0 | 0.5 | 1.0 |
| NMO | 0.75 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| MFO | 1.0 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| Índice de P | | 2.88 | 1.58 | 2.70 |

SE = erosión del suelo; RC = clase de escorrentía; PSW = distancia al cuerpo de agua y zona de amortiguamiento; CPS = contenido de P en el suelo; NFI = nivel de aplicación de fertilizante inorgánico; MFI = método y frecuencia de aplicación de fertilizante inorgánico; NMO = nivel de aplicación de material orgánico; MFO = método y frecuencia de aplicación de material orgánico.

VI. CONCLUSIONES

El trabajo conducido en esta tesis provee de información cuantitativa relacionada con la concentración y descargas de nitrógeno total Kjeldhal (NTK), fósforo total (PT), fósforo disuelto (PD) y sedimentos suspendidos (SS) en eventos de tormenta monitoreados en el periodo de Agosto del 2003 a Julio del 2004 en dos micro cuencas adyacentes dentro de la cuenca del Río Grande de Añasco.

Del presente estudio se puede concluir lo siguiente:

1. Los valores promedios de las concentraciones de SS fueron de $1551.92 \text{ mg L}^{-1}$ y $2737.81 \text{ mg L}^{-1}$ para las micro cuencas de Miraflores y Cerro Gordo respectivamente. Las concentraciones promedio de PT excedieron de 0.1 mg L^{-1} (límite umbral sugerido para eutroficación) para ambas micro cuencas, en Miraflores se obtuvo un valor de 0.34 mg L^{-1} y en Cerro Gordo un valor de 0.48 mg L^{-1} . Las concentraciones promedio de NTK fueron de 1.70 mg L^{-1} para Miraflores y de 3.15 mg L^{-1} en Cerro Gordo.
2. Las descargas (expresada en kg ha^{-1}) de SS y nutrientes en la micro cuenca de Cerro Gordo fueron mayores que en Miraflores. Los SS alcanzaron una razón de 4.5 veces mayor, en PT, PD y NTK fueron de 1.7, 1.5 y 2.3 veces superiores, respectivamente.
3. Los valores promedios de flujo, concentración de SS y PD tuvieron diferencias estadísticamente significativas entre las micro cuencas Miraflores y Cerro Gordo. Contrariamente, las concentraciones medias de nutrientes como PT y NTK no tuvieron una diferencia estadísticamente significativas entre micro cuencas. Estos resultados no reflejan cuantitativamente las diferencias proporcionales en usos de

terreno, pero sugieren que los nutrientes provienen de fuentes dispersas de contaminación como son las viviendas rurales sin alcantarillado y pequeños animales en el caso de Miraflores y la agricultura intensiva con aplicación de fertilizantes inorgánicos como fuente principal en el caso de Cerro Gordo.

4. El aumento en las descargas de SS, NTK, PT y PD en Cerro Gordo pudo deberse al aumento en el área proporcional agrícola. Las fuentes principales que pudieron aportar a estos parámetros son la zona agrícola y la zona urbana. La zona agrícola fue de 146 ha, representando un 20.2% del área total de Cerro Gordo y fue casi 17 veces el área agrícola de Miraflores. En cambio la otra zona que pudo aportar, la zona urbana, fue menor en términos de área y en términos proporcionales. Esta zona fue la que probablemente incidió más en las concentraciones de nutrientes cuantificados en Miraflores.
5. Debido al gran número de variables potenciales e independientes y sus interrelaciones complejas, con el presente estudio, no fue posible relacionar cuantitativamente las concentraciones de nutrientes y sedimentos suspendidos con los usos de terreno mixtos.
6. En base a la aplicación del índice de P se encontró un bajo (≤ 2.7) potencial de movimiento de P de los terrenos agrícolas hacia el cuerpo de agua en todas las parcelas evaluadas en la micro cuenca Miraflores. Sin embargo, en el ámbito de la micro cuenca Cerro Gordo se encontró en una de las tres parcelas evaluadas un potencial de movimiento de P medio ($2.7 \leq IP \leq 5.5$) hacia el cuerpo de agua. Esta herramienta no reflejó directamente el impacto de las actividades antropogénicas sobre la de calidad de agua asociada con eventos de tormenta,

pero demuestra que hay una mayor tendencia de las actividades agrícolas hacia la contribución de nutrientes y sedimentos suspendidos en la micro cuenca Cerro Gordo que en Miraflores.

7. La generación de los modelos de regresión que relacionan el volumen total del evento con las cargas de SS, PT y NTK tuvieron una alta correlación en ambas micro cuencas, lo cual sugiere que se puedan aplicar a otras micro cuencas del Río Grande de Añasco con características similares.

VII. RECOMENDACIONES

Con base en la información generada en este trabajo se recomienda:

1. La utilización de los datos en la calibración de modelos computarizados que consideren la complejidad de interacciones a una escala de cuenca para determinar las relaciones entre la concentración de nutrientes y sedimentos suspendidos con las características de usos de terreno mixtos.
2. Establecer comparaciones entre el método de muestreo compuesto con muestreo de botellas individuales para cada sub muestra, lo que permitiría un mejor entendimiento sobre la dinámica de los nutrientes particulados y disueltos asociados con el flujo.

LITERATURA CITADA

- Addiscott, T.M., D. Brockie, J.A. Catt, D.G. Christian, G.L. Harris, K.R. Howse, N.A. Mirza y T.J. Pepper. 2000. Phosphate losses through field drains in a heavy cultivated. *J. Environ. Qual.* 29: 522-532.
- Anderson, J.R. E.E. Hardy, J.T. Roach, and R.E. Witmer. 1976. A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. US Geological Survey Professional Paper 964.
- Alberts, E.E. y R.G. Spomer. 1985. Dissolved nitrogen and phosphorus in runoff from watersheds in conservation and conventional tillage. *J. Soil Water Conserv.* 40: 153-157.
- Beuselinck, L., A. Steegen, G. Govers, J. Nachtergaele, I. Takken, y J. Poesen. 2000. Characteristics of sediment deposits by major rainfall events in small catchments in the Belgian Loam Belt. *Geomorphology* 32: 69-82.
- Brodizio, E.S., E.F. Moran, P. Mausel, y Y. Wu. 1994. Land use change in the Amazon estuary: patterns of caboclo settlement and landscape management. *Human Ecology* 22: 249-278.
- Castillo, M.J., J.D. Allan y S. Brunzell. 2000. Nutrient concentrations and discharges in a midwestern agricultural catchment. *J. Environ. Qual.* 29: 1142-1151.
- Castro, J.A., D. Sotomayor-Ramírez y G. Martínez. 2002. Caribbean Area Phosphorus Index. USDA-NRCS Electronic Field Office Technical Guide. Disponible en: <http://efotg.nrcs.usda.gov/treemenusFS.aspx?Fips=72101&MenuName=MenuCR.zip>
- Correll, D.L., T.E. Jordan y D.E. Weller. 1999. Transport of nitrogen and phosphorus from Rhode River watersheds during storm events. *Water Resources Research* 35: 2513-2521.
- Daniel, T.C., A.N. Sharpley y J.L. Lemunyon, 1998. Agricultural phosphorus and eutrophication: A symposium overview. *J. Environ. Qual.* 27: 251-257.
- David, M.B. y L.E. Gentry. 2000. Anthropogenic inputs of nitrogen and phosphorus and riverine export for Illinois, USA. *J. Environ. Qual.* 29: 494-508.
- Dengo, G. y J.E. Case. 1990. The geology of North America Volume H: the Caribbean Region. The Geological Society of North America: Boulder, Colorado.

- Díaz-Ramírez, J., L.R. Pérez-Alegría y G.A. Suarez-Narvaez. 2003. Technical review Comité Site Visit. Tropical Center for Earth and Studies. Lajas, Puerto Rico. 17 al 20 de abril del 2004.
- Díaz, J.R., A. Aquino, C. Figueroa-Alamo, R.J. Vachier y A.V. Sanchez. 1993. Water resources data, Puerto Rico and the Virgen Islands, Water year 1993. U.S. Geological Survey, water-data report PR-93-1.
- Díaz, J.R. y D.G. Jordan. 1987. Water resources of the Rio Grande de Añasco- lower valley, Puerto Rico. U.S. Geological Survey water resources investigations report 85-4237: San Juan, Puerto Rico.
- Dorioz, J.M., E.A. Casell, A. Orand y K.G. Eiseman. 1998. Phosphorus storage, transport and export in the Foron River watershed. *Hidrol. Proces.* 12: 285-309.
- Edwards, D.R., y T.C. Daniel. 1993. Effects of litter application rate and rainfall intensity on quality of runoff from Fescuegrass plots. *J. Environ. Qual.* 22: 361-365.
- Environmental System Research Institute. 1996. Arc View, the geographic information system for everyone. New York Strert, Redlands, USA. 380 p.
- Evans, R. 1978. Soil erosion in north Norfolk. *J. Agric. Sci. Cambridge.* 90: 185-192.
- Gburek, W.J., A.N. Sharpley, A.L. Healtwaite y G.J. Foldor. 2000. Phosphorus management at the watershed scale: A modification of the phosphorus index. *J. Environ. Qual.* 29: 130-144.
- Gierbolini, R.E. 1975. Soil survey of Mayaguez area of western Puerto Rico. U.S. Departament of Agriculture, Soil Conservation Service, 296 p.
- Haygarth, P.M, L. Hepwoth y S.C. Jarvis. 1998. Forms of phosphorus transfer in hidrological pathways from soil under grazed grassland. *J. Soil Sci.* 49: 65-72.
- Haygarth, P.M. y S.C. Jarvis. 1999. Transfer of phosphorus from agricultural soil. *Adv. Agron.* 66: 195-249.
- Haygarth, P.M. y A.N. Sharpley. 2000. Terminology for phosphorus transport. *J. Environ. Qual.* 29: 10-15.
- Hodun, O.S., y T.P. Burt. 1997. Storm-event transport of phosphorus in the absence of surface runoff generation. P. 377-379. En H. Tunney et al. (ed.) Phosphorus loss from soil to water. CAB Int., Wallingford. UK.

- Holtan, H., L. Kamp-Nielsen y A.O. Stuanes. 1988. Phosphorus in soil, water and sediment: An overview. *Hidrobiologia* 170: 19-34.
- House, W.A., T.D. Jikells, A.C. Edwards, K.E. Praska y F.H. Denison. 1998. Reactions of phosphorus with sediment in fresh and marine waters. *Journal Soil Use and Management*. 14: 139-146.
- Johnes, P.J. y R.A. Hodgkinson, 1998. Phosphorus loss from agricultural catchments: Pathways and implications for management. *Journal Soil Use and Management*. 14: 175-185.
- Johnson, A.H., D.R. Bouldin, E.A. Goyette y A.M. Hedges. 1976. Phosphorus loss by stream transport from a rural watershed: Quantities, processes, and sources. *J. Environ. Qual.* 5: 148-157.
- Lemunyon, J.L. y Gilbert, R.C. 1993. The concept and need for a phosphorus assessment tool. *J. Prod. Agric.* 6: 483-486.
- Logan, T.J. y G.O. Schwap. 1976. Nutrient and sediment characteristics of tile effluent in Ohio. *J. Soil Water Conserv.* 31: 24-27.
- Mattson, P.H. 1960. Geology of the Mayaguez area, Puerto Rico. *Geological Society of America Bulletin* 71: 319-362.
- McDowell, R.W., A.N. Sharpley y P.J.A. Kleiman. 2001. Integrating phosphorus and nitrogen decision management at watershed scales. En resumen de Simposio *Integrated Decision-Making for Watershed Management*. 7 a 9 de enero 2001. Virginia Polytechnic Inst. and State Univ., Blacksburg, VA.
- Mozaffari, M. y J.T. Sims. 1994. Phosphorus availability and sorption in an Atlantic coastal plain watershed dominated by animal-based agriculture. *Soil Sci.* 157: 97-107.
- Nearing, M., G. Govers y L.D. Norton. 1999. Variability in soil erosion data from replicated plots. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1829-1835.
- Needelman, B.A., W.J. Gburek, A.N. Sharpley y G.W. Petersen. 2001. Environmental management of soil phosphorus: Modeling spatial variability in small fields. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1516-1522.
- Negrón, E. 1983. A study of eutrophication and aquatic plants growth in selected lakes and rivers of Puerto Rico. Final technical report. Water Resources Research Institute, School of Engineering, Univ. of Puerto Rico. 24 p.

- Olsen, S. R. y L. E. Sommers. 1982. Phosphorus. En A. L. Page et al (eds.). *Methods of Soil Analysis Part 2. Chemical and microbiological properties*. 2^{da} edición American Society of Agronomy monograph N° 9. 403-430.
- Owens, L.B., W.N. Edwards y R.W. Keuren. 1991. Baseflow and storm transport of nutrients from mixed agricultural watersheds. *J. Environ. Qual.* 20: 407-414.
- Parry, R. 1998. Agricultural phosphorus and water quality: A U.S. Environmental Protection Agency Perspective. *J. Environ. Qual.* 27: 258-261.
- Peterjohn, W.T. y D.L. Correll. 1984. Nutrient dynamics in an agricultural watersheds: Observations of the role of a riparian forest. *Ecol.* 65: 1466-1475.
- Phillips, P.A., J.L.B. Culley, F.R. Hore y N.K. Patri. 1982. Dissolved inorganic nitrogen and phosphorus concentrations in discharge from two agricultural catchments in eastern Ontario. *Agr. Water Manage.* 5: 29-40.
- Probst, J.L. 1985. Nitrogen and phosphorus exportation in the Garonne Basin (France). *J. Hidrol.* 76: 281-305.
- Rámos-Guínés, O. 1997. Water balance and quantification of total phosphorus and total nitrogen loads entering and leaving the Lago de Cidra, central Puerto Rico. U.S. Geological Survey. Water Resources Investigation Report 96-4222.
- SAS Institute, 2001. User's Guide. Release 8.01. SAS Institute, Cary, NC.
- Schreiber, J.D. y D.L. Rausch. 1979. Suspended sediment-phosphorus relationships for the inflow and outflow of a flood detention reservoir. *J. Environ. Qual.* 8: 510-514.
- Sharpley, A.N., S.C. Chapra, R. Wedephol, J.T. Sims, T.C. Daniel y K.R. Reddy. 1994. Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and options. *J. Environ. Qual.* 23: 437-451.
- Sharpley, A.N., T.C. Daniel y D.R. Edwards. 1993. Phosphorus movement in the landscape. *J. Prod. Agric.* 6: 492-500.
- Sharpley, A.N., T.C. Daniel, T.J. Sims y D.H. Pote. 1996. Determining environmentally sound soil phosphorus levels. *J. Soil Water Conserv.* 51: 160-166.
- Sharpley, A.N., R.H. Foy y P.J.A. Withers. 2000. Practical and innovative measures for the control of agricultural phosphorus losses to water: An overview. *J. Environ. Qual.* 29: 176-181.

- Sharpley, A.N., W.J. Gburek, G. Folmar y H.B. Pionke. 1999. Sources of phosphorus exported from an agricultural watershed in Pennsylvania. *Agric. Water Manage.* 41: 77-89.
- Sharpley, A.N. y R.G. Menzel. 1987. The impact of soil and fertilizer phosphorus on the environment. *Adv. Agron.* 41: 297-324.
- Sharpley, A.N. y S.J. Smith. 1991. Effects of cover crops on surface water quality. Pp: 41-49. En W.L. Hargrove (ed.) *Cover crops for clean water.* Soil and Water Conservation Society.
- Sharpley, A.N., S.J. Smith, O.R. Jones, W.A. Berg y G.A. Coleman. 1992. The transport of bioavailable phosphorus in agricultural runoff. *J. Environ. Qual.* 21: 30-35.
- Sharpley, A.N. y J.K. Syers. 1976. Phosphorus transport in surface run-off as influenced by fertilizer and grazing cattle. *New Zeland J. Sci.* 19: 277-282.
- Sharpley, A.N., J.K. Syers y P.W. O'Connor. 1976. Phosphorus inputs into a stream draining an agricultural watershed: I sampling. *Water Air and Soil Pollut.* 6: 39-52.
- Sharpley, A.N., S.J. Smith, J.R. Williams, O.R., Jones, y G.A. Coleman. 1991. Water quality impacts associated with sorghum culture in the Southern Plains. *J. Environ. Qual.* 20: 239-244.
- Sharpley, A.N. y H. Tunney. 2000. Phosphorus research strategies to meet agricultural and environmental challenges of the 21st century. *J. environ. Qual.* 29: 176-181.
- Sonzogni, W.C., S.C. Chapra, D.E. Armstrong y T.J. Logan. 1982. Bioavailability of phosphorus inputs to lakes. *J. Environ. Qual.* 11: 555-563.
- Sotomayor-Ramírez, D., G. Martínez y L.J. Olivieri. 2001. Phosphorus status of stream waters in Puerto Rico: 1989-1997. *J. Agric. Univ. P.R.* 85: 1-14.
- Sotomayor-Ramírez, D., L. R. Pérez-Alegría y G. Martínez. 2004. Nutrient discharges from Mayagüez Bay Watershed. Summary Report of Project. PRWRRRI - College of Agric. Sciences. Diciembre, 2004. 60 p.
- Steegeen, A., G. Govers, J. Nachtergaele, I. Takken, L. Beuselinck y J. Poesen. 2000. Sediment export by water from an agricultural catchment in the Loam Belt in central Belgium. *Geomorphology* 33: 25-36.
- Steegeen, A., G. Govers, I. Takken, J. Nachtergaele, J. Poesen y R. Merckx. 2001. Factors controlling sediment and phosphorus export from two belgian agricultural catchments. *J. Environ. Qual.* 30: 1249-1258.

- Stevens, D.P., J.W. Cox y D.J. Chittleborough. 1999. Pathways of phosphorus, nitrogen, and carbon movement over and through texturally differentiated soils. *Aust. J. Soil Res.* 37: 679-693.
- USDA - Natural Resources Conservation Service. 1997. National Soil Survey handbook . Title 430 VI. Washington, D.C. U.S Government printing Office. 437p.
- USDA -. Natural Resources Conservation Service. 2001. Phosphorus index for Alabama. *A Planning Toll to Assess and Manage P Movement*. Agronomy technical Note AL-72. 5 p.
- USDA – Natural Resources Conservation Service. 2001. Detailed Soil Survey Data for GIS (SSURGO). United States, Department of Agriculture. Disponible en: http://www.ftw.nrcs.usda.gov/ssur_data.html
- USEPA. 1986. Quality criteria for water. Office of water Regulation and Standards. EPA – 440/5-86-001. USEPA Washington, DC.
- USEPA. 1996. Environmental indicators of water quality in the United States. EPA 841-R-96-002. USEPA. Office of water (4503 F) U.S. Gov. print Office, Washington, DC.
- USEPA, 1999. EPA Methods and guidance for analysis of water. USEPA, Washinton, D.C. CD-ROM versión 2.0. USEPA. 1999.
- USGS. 1998. Water resources data for Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands. Water year 1998. U.S. Geological Survey, Water Resources Division.
- Vachier, R.J. 1994. Puerto Rico stream water quality. U.S. Geological Survey Water – Supply paper 2400.
- Vaithiyathan, P. y D.L. Correll. 1992. The Rhode River Watershed: Phosphorus distribution and export in forest and agricultural soils. *J. Environ. Qual.* 21: 280-288.
- Walling, D.E. 1983. The sediment delivery problem. *J. Hidrol.* 65: 209-237.

APENDICES

Apéndice A

Descripción de suelos, según Gierbolini (1975)

- **AoE2** (Anones arcilloso lómico, 20 a 40% de declive). Suelos bien drenados, fuertemente ácidos y moderadamente permeables. Se han formado de materiales residuales que consisten de saprolito volcánico altamente meteorizado y de color rosado. La capa superficial es roja, fuertemente ácida, arcilloso lómica, alrededor de 6 pulgadas de espesor. Se encuentra en laderas y en cumbres de las alturas. La escorrentía es rápida, la capacidad de retención de agua es moderada, la fertilidad natural es de moderada a baja.

- **CbF2** (Caguabo arcilloso lómico, 20-60% de declive, erodado). Suelos poco profundos, de buen drenaje, ligeramente ácidos y moderadamente permeables. Se han formado de un suelo muy gravoso de rocas volcánicas básicas. La capa superficial es pardo grisáceo oscura, ligeramente ácida, arcillo-lómica, de alrededor de 4 pulgadas de espesor. Se encuentra en laderas y cumbres muy fuertemente bisectadas. La escorrentía es rápida y la erosión es un peligro.

- **CoE** (Consumo arcilloso, 20-40% de declive). Suelos de buen drenaje, que son muy fuertemente ácidos y moderadamente permeables. Se han formado de en materiales residuales, meteorizados de rocas volcánicas y tufáceas. La capa superficial es pardo rojiza, muy fuertemente ácida, de textura arcillosa y de alrededor de 6 pulgadas de espesor. Suelo que se encuentra en laderas y cumbres de las alturas volcánicas. La escorrentía es rápida y la erosión es un peligro.

- **CoF2** (Consumo arcilloso, 40 a 60% de declive, erodado). Suelo de laderas y cumbres fuertemente bisectadas a través de todas las alturas volcánicas. La escorrentía es rápida y la erosión es un peligro severo. Se incluyen áreas severamente erodadas donde el saprofito está expuesto en la superficie. El declive, la escorrentía, la poca profundidad al saprofito, la erosión pasada y el peligro de la erosión futura son limitaciones severas.

- **HmD2** (Humatas arcillos, 12 a 20% de declive, erodado). Suelos con escaso declive, no han sido muy afectados por la erosión. La escorrentía es mediana y la erosión es un peligro. La capacidad de retención de humedad es alta y la fertilidad es media. El declive, la escorrentía, la erosión pasada y el peligro de erosión en un futuro son limitantes.

- **HmF2** (Humatas arcilloso, 40 a 60% de declive, erodado). Suelos profundos, de buen drenaje, fuertemente ácidos y moderadamente permeables. Están en las laderas y cumbres estrechas de las alturas. Se han formado de material residual meteorizado de las rocas volcánicas. La capa superficial es pardo oscura, muy fuertemente ácida, de textura arcillosa y de alrededor de 4 pulgadas de espesor. La escorrentía es rápida y la erosión es un peligro severo.

- **MwE2** (Morado arcilloso lómico, 20-40% de declive, erodado). Suelos moderadamente profundos, de buen drenaje, y moderadamente permeables. Se han formado en material residual meteorizado de rocas volcánicas color gris rojizo. La capa superficial es gris rojiza oscura, neutral, de textura arcillosa lómica y de alrededor de 7 pulgadas de espesor.

Está en laderas y cumbres redondeadas de las alturas volcánicas. Es fértil y tiene una capacidad de retención moderada. La escorrentía es rápida y la erosión es un peligro severo.

- **Re** (Reilly cascajoso lómico). Suelos cascajosos, con drenaje excesivo, poco profundos al cascajo y arena y tienen una permeabilidad rápida. Estos suelos están adyacentes a los ríos y se inundan frecuentemente. Se han formado en sedimentos aluviales de textura gruesa que están estratificados con cascajo y arena. La capa superficial es pardo oscura, medianamente ácida, de textura lómica cascajosa y alrededor de 9 pulgadas de espesor.

- **ToA** (Toa limo arcilloso lómico, 0-2% de declive). Suelos profundos, de drenaje moderadamente bueno, que son ligeramente ácidos y moderadamente permeables. Estos suelos están en los llanos inundables a lo largo de los ríos. Se han formado en sedimentos aluviales estratificados, de textura moderadamente fina y fina, lavados de los montes volcánicos y calizos. La capa superficial es pardo oscura, ligeramente ácida, de textura limo arcilloso lómica, alrededor de 10 pulgadas de espesor.

Apéndice B

Hidrogramas de escorrentía para micro cuenca Miraflores

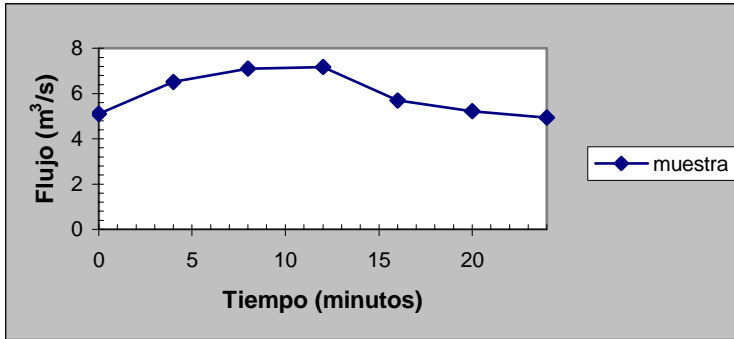


Figura B.1. Hidrograma de escorrentía del evento número 1 (6-Set.-03)

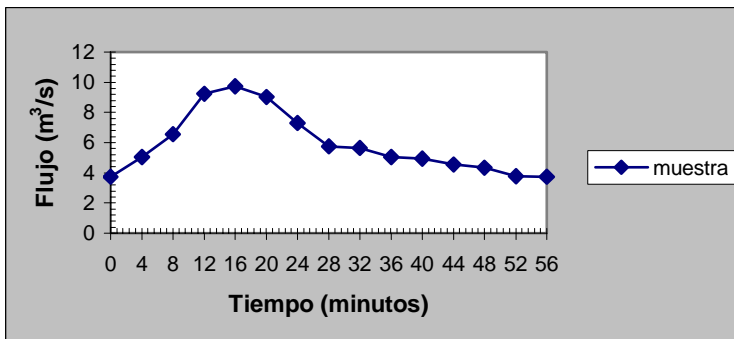


Figura B.2. Hidrograma de escorrentía del evento número 2 (13-Set.-03)

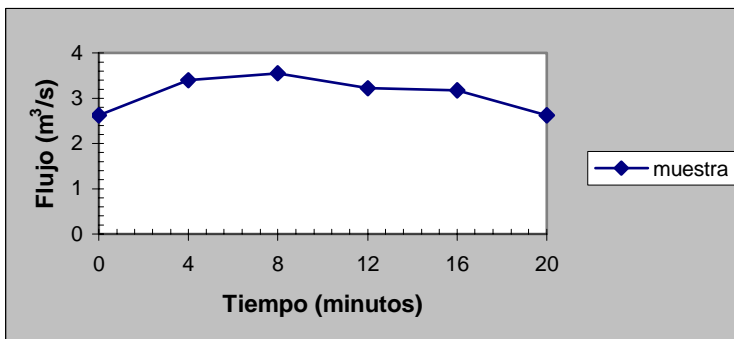


Figura B.3. Hidrograma de escorrentía del evento número 3 (23-Set.-03)

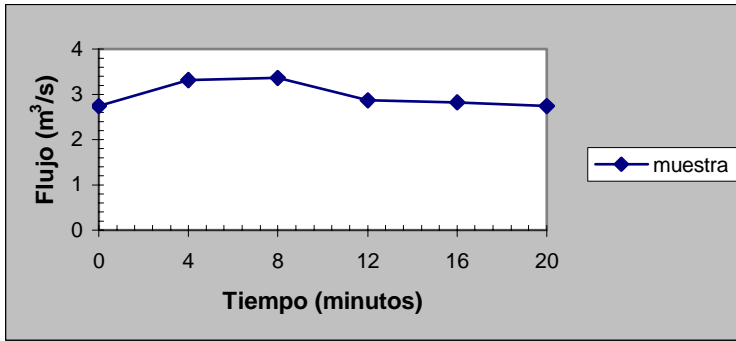


Figura B.4. Hidrograma de escorrentía del evento número 4 (26-Set.-03)

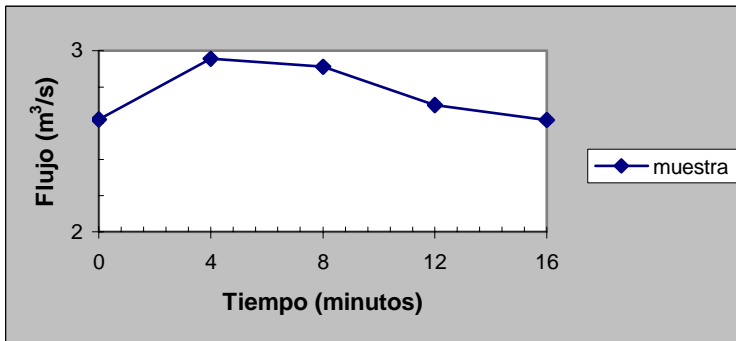


Figura B.5. Hidrograma de escorrentía del evento número 5 (10-Oct.-03)

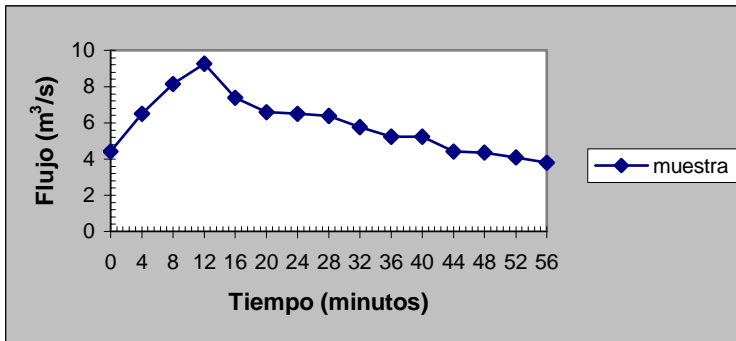


Figura B.6. Hidrograma de escorrentía del evento número 6 (16-Oct.-03)

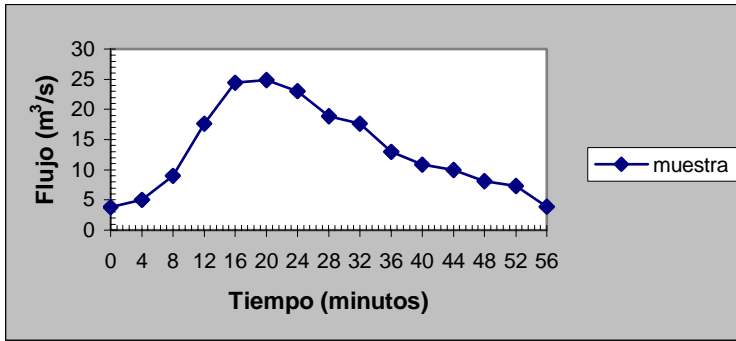


Figura B.7. Hidrograma de escorrentía del evento número 7 (17-Oct.-03)

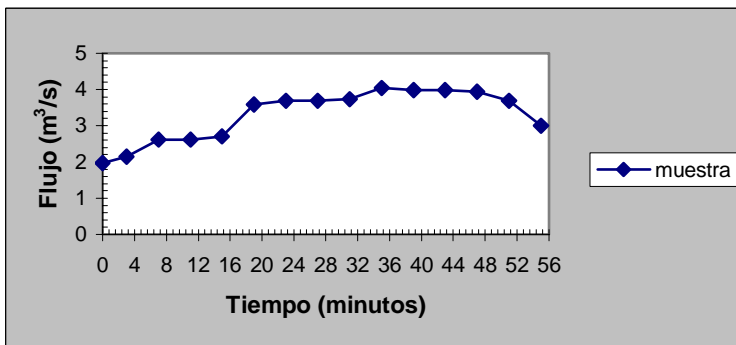


Figura B.8. Hidrograma de escorrentía del evento número 8 (26-Oct.-03)

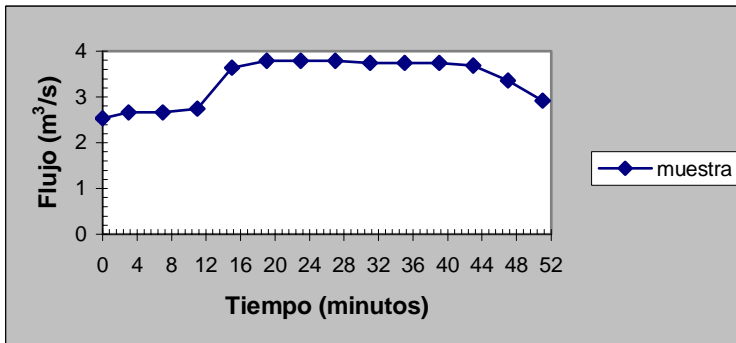


Figura B.9. Hidrograma de escorrentía del evento número 9 (29-Oct.-03)

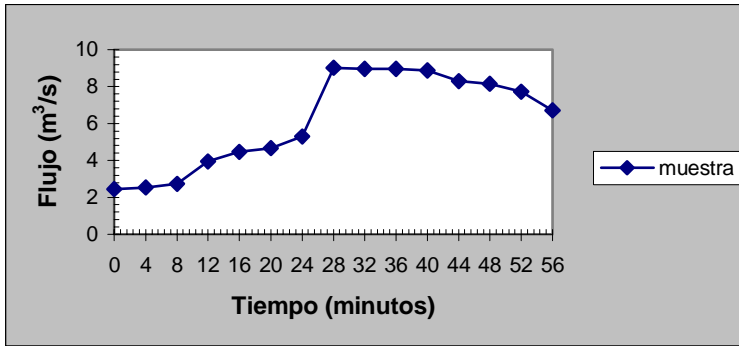


Figura B.10. Hidrograma de escorrentía del evento número 10 (31-Oct.-03)

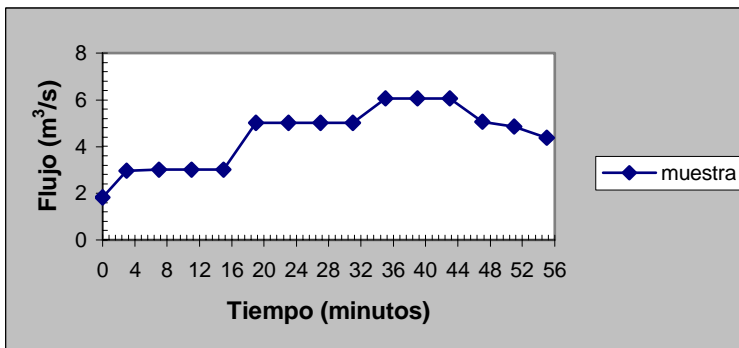


Figura B.11. Hidrograma de escorrentía del evento número 11 (03-Nov.-03)

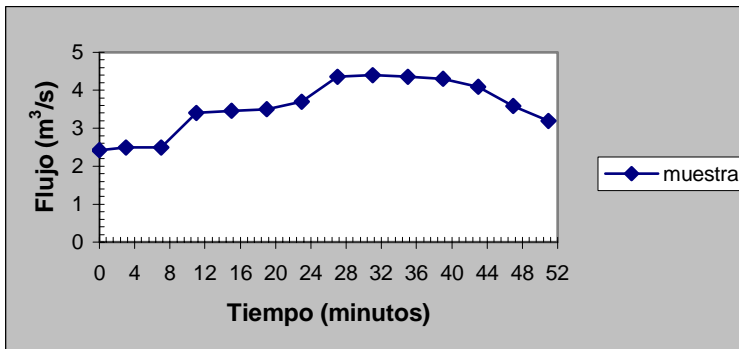


Figura B.12. Hidrograma de escorrentía del evento número 12 (10-Nov.-03)

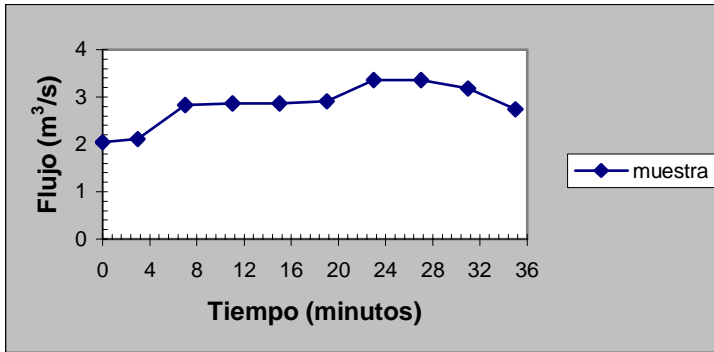


Figura B.13. Hidrograma de escorrentía del evento número 13 (18-Nov.-03)

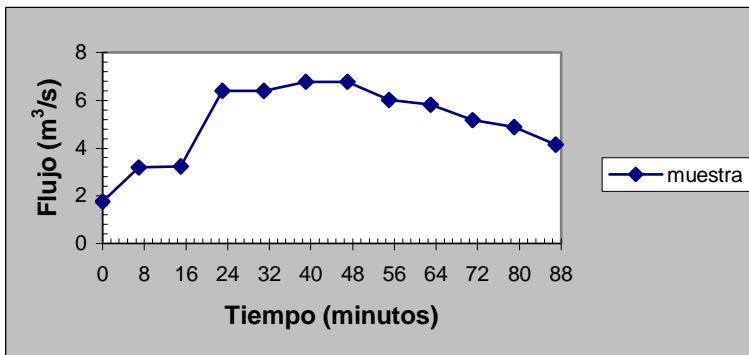


Figura B.14. Hidrograma de escorrentía del evento número 14 (22-Nov.-03)

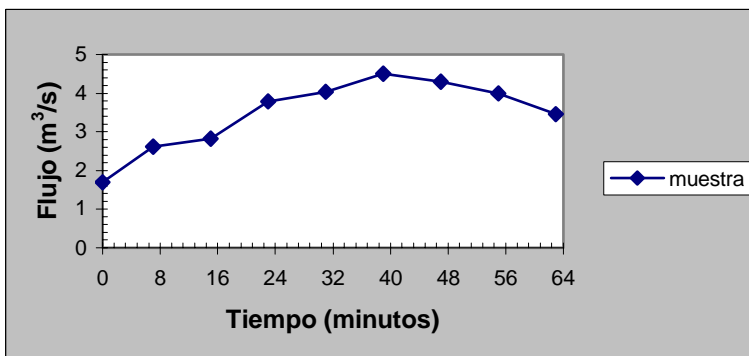


Figura B.15. Hidrograma de escorrentía del evento número 15 (26-Nov.-03)

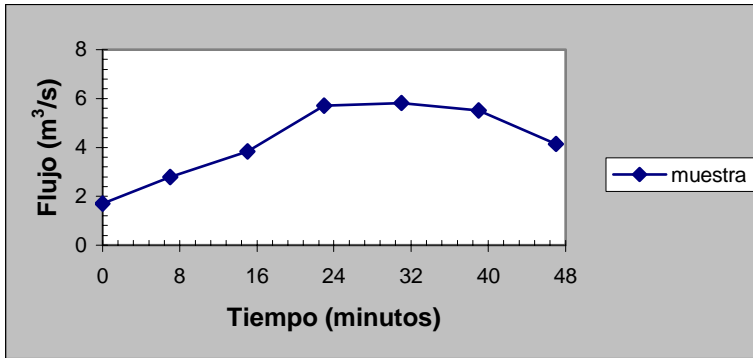


Figura B.16. Hidrograma de escorrentía del evento número 16 (07-Dic.-03)

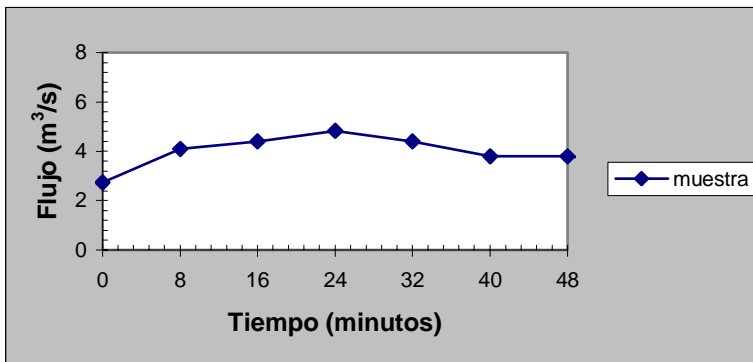


Figura B.17. Hidrograma de escorrentía del evento número 17 (14-Dic.-03)

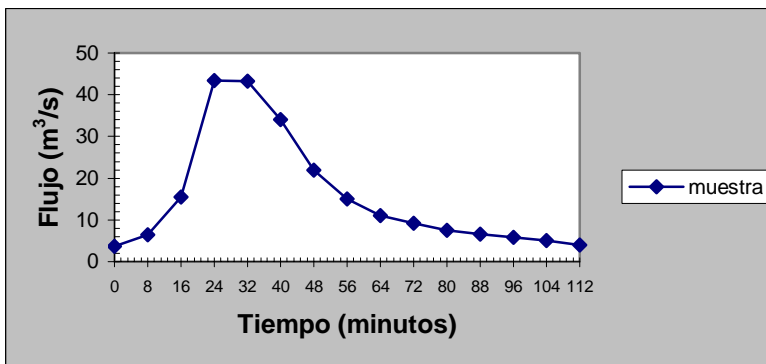


Figura B.18. Hidrograma de escorrentía del evento número 18 (12-May.-04)

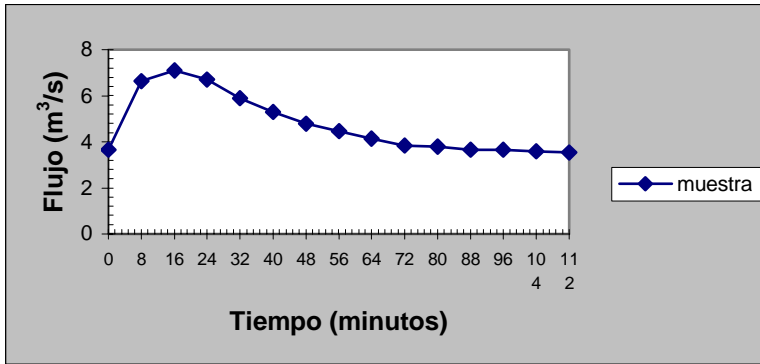


Figura B.19. Hidrograma de escorrentía del evento número 19 (14-May.-04)

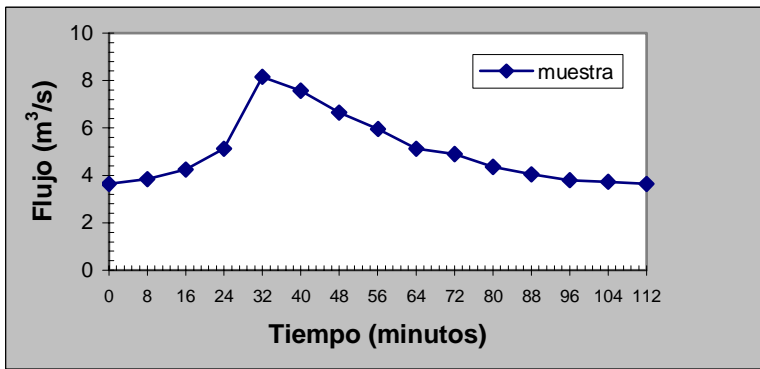


Figura B.20. Hidrograma de escorrentía del evento número 20 (29-May.-04)

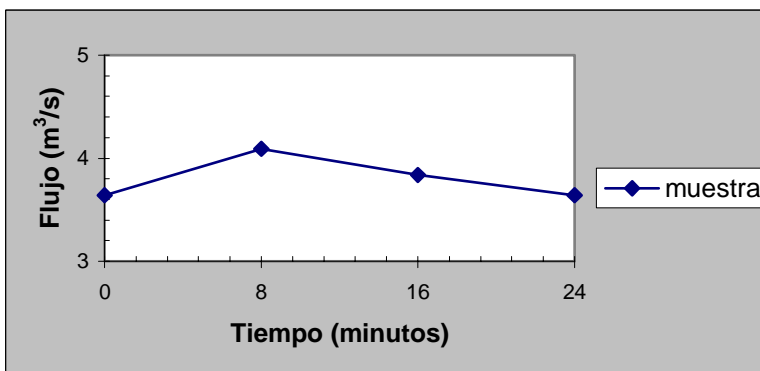


Figura B.21. Hidrograma de escorrentía del evento número 21 (23-Jun.-04)

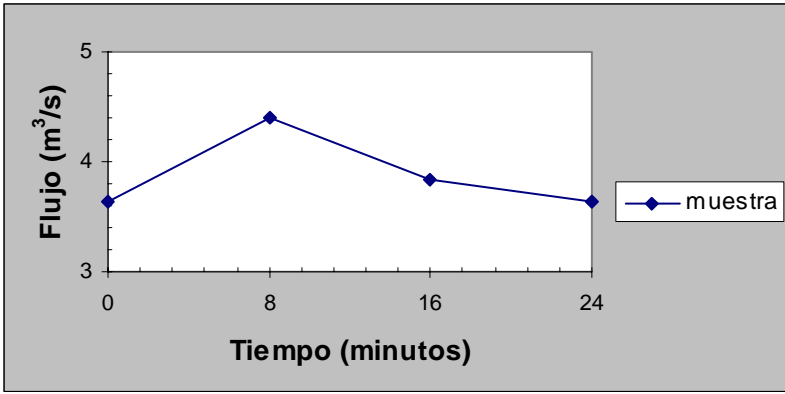


Figura B.22. Hidrograma de escorrentía del evento número 22 (30-Jun.-04)

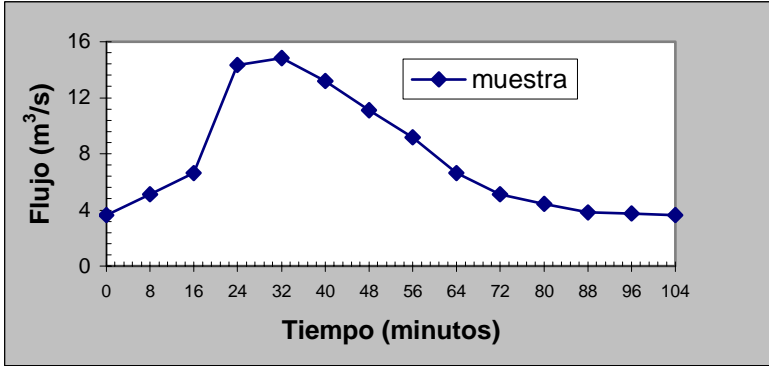


Figura B.23. Hidrograma de escorrentía del evento número 23 (30-Jun.-04)

Apéndice C

Hidrogramas de escorrentía para micro cuenca Cerro Gordo

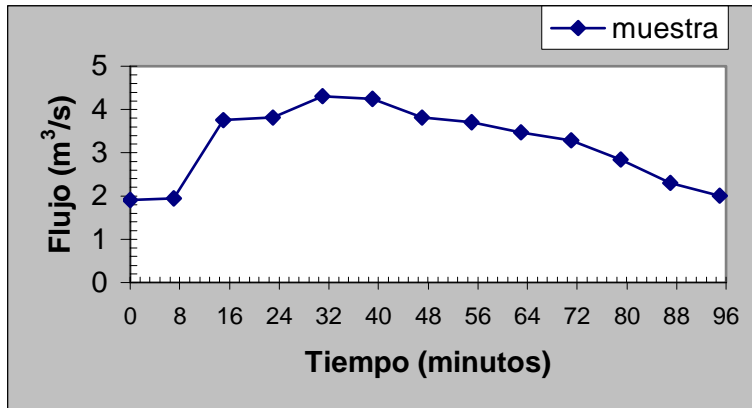


Figura C.1. Hidrograma de escorrentía del evento número 1 (20-Oct.-03)

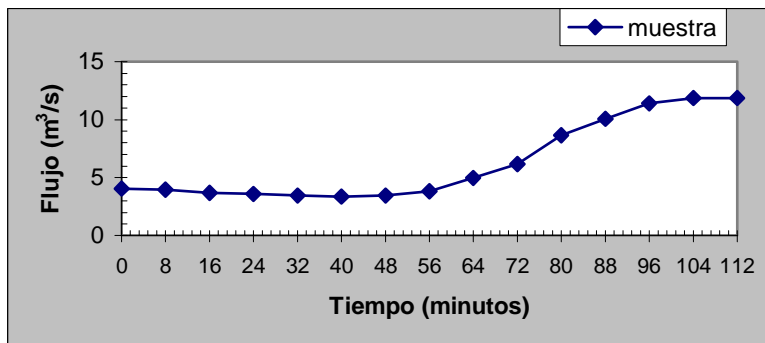


Figura C.2. Hidrograma de escorrentía del evento número 2 (24-Oct.-03)

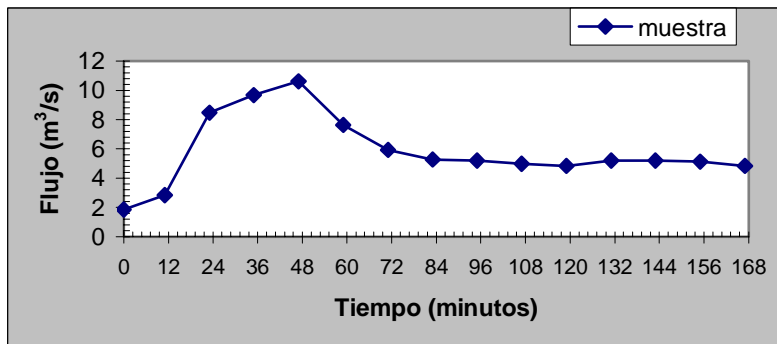


Figura C.3. Hidrograma de escorrentía del evento número 3 (25-Oct.-03)

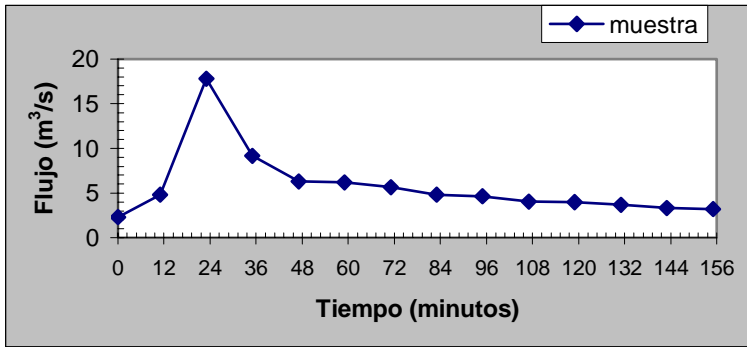


Figura C.4. Hidrograma de escorrentía del evento número 4 (26-Oct.-03)

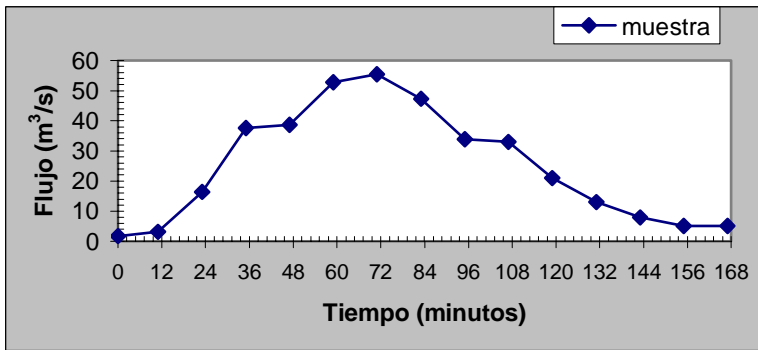


Figura C.5. Hidrograma de escorrentía del evento número 5 (01-Nov.-03)

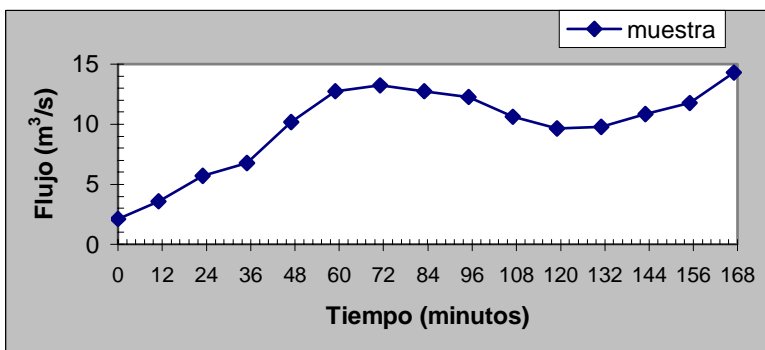


Figura C.6. Hidrograma de escorrentía del evento número 6 (12-Nov.-03)

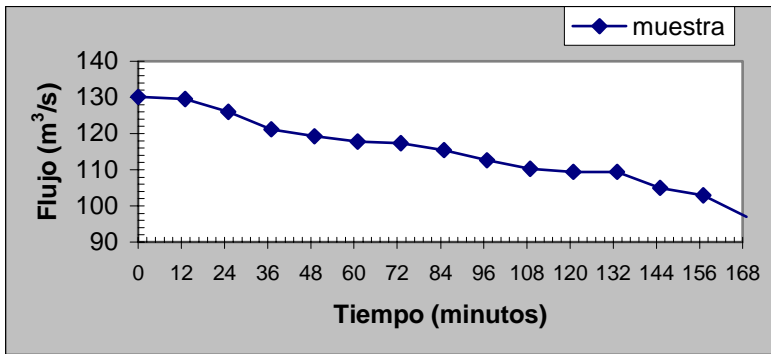


Figura C.7. Hidrograma de escorrentía del evento número 7 (13-Nov.-03)

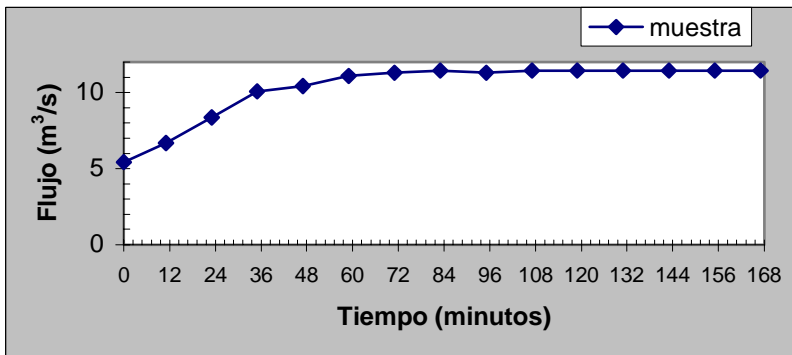


Figura C.8. Hidrograma de escorrentía del evento número 8 (15-Nov.-03)

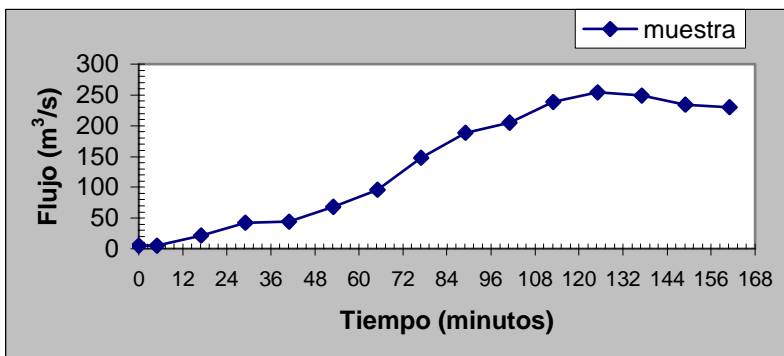


Figura C.9. Hidrograma de escorrentía del evento número 9 (18-Nov.-03)

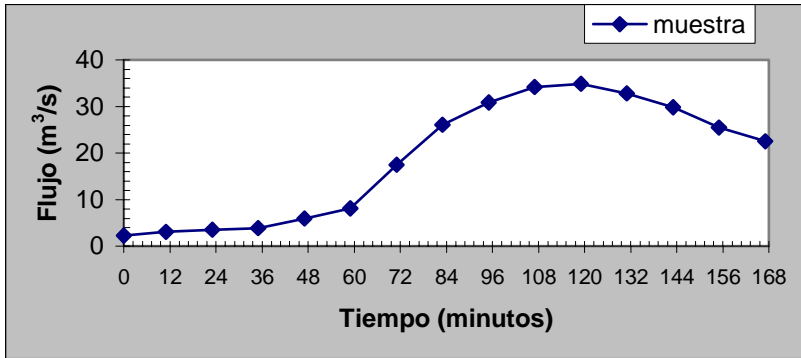


Figura C.10. Hidrograma de escorrentía del evento número 10 (07-Dic.-03)

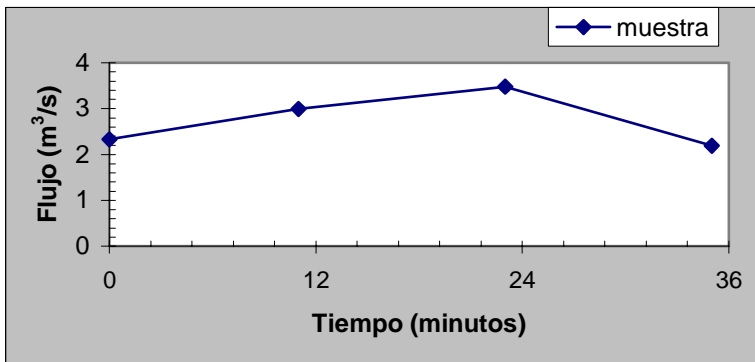


Figura C.11. Hidrograma de escorrentía del evento número 11 (14-Dic.-03)

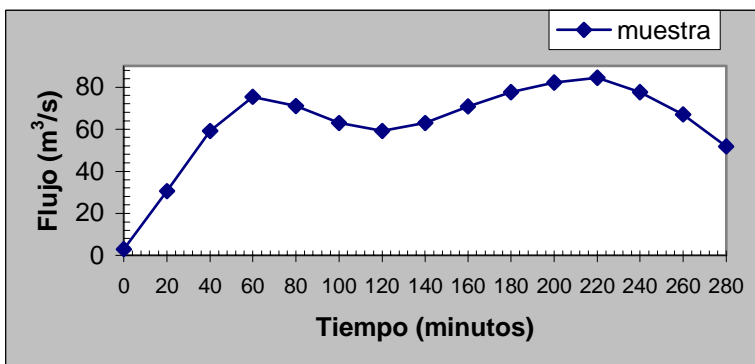


Figura C.12. Hidrograma de escorrentía del evento número 12 (08-May.-04)

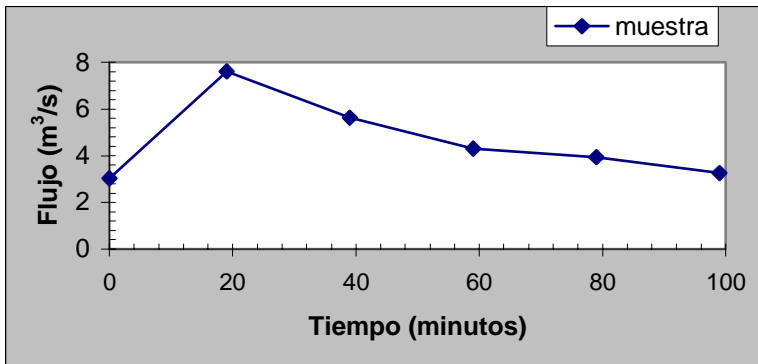


Figura C.13. Hidrograma de escorrentía del evento número 13 (12-May.-04)

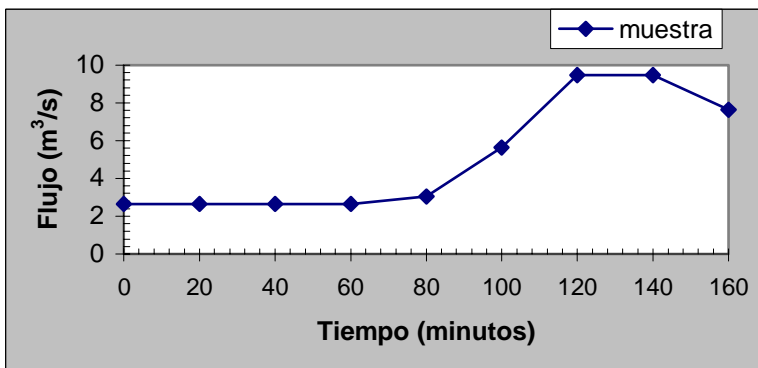


Figura C.14. Hidrograma de escorrentía del evento número 14 (14-May.-04)

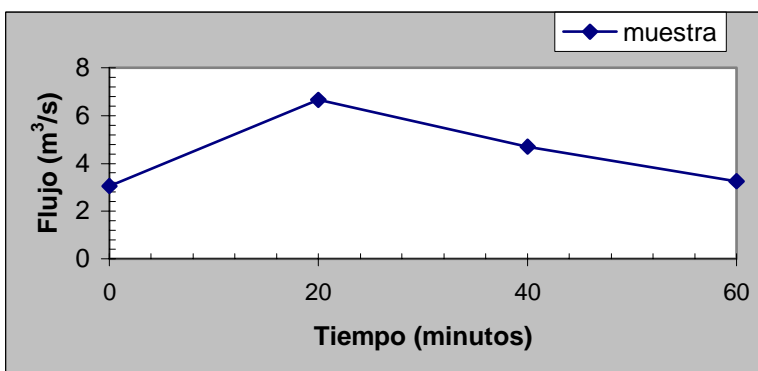


Figura C.15. Hidrograma de escorrentía del evento número 15 (19-May.-04)

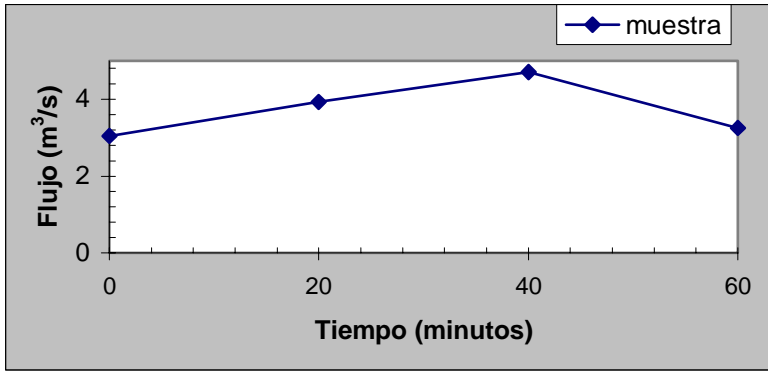


Figura C.16. Hidrograma de escorrentía del evento número 16 (10-Jun.-04)

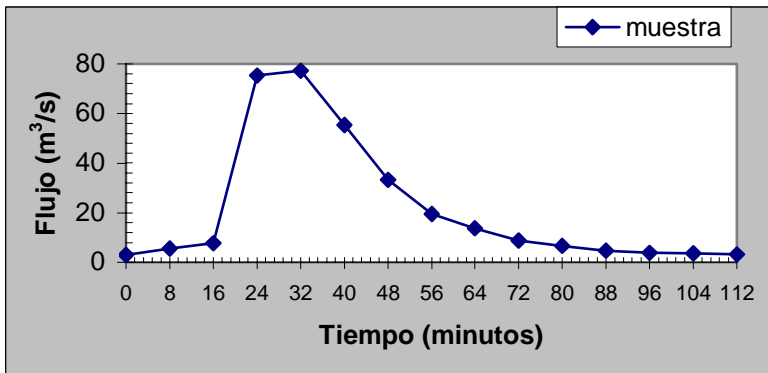


Figura C.17. Hidrograma de escorrentía del evento número 17 (26-Jun.-04)

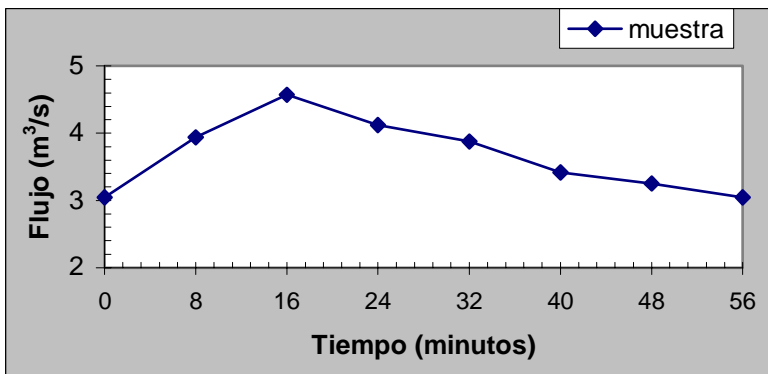


Figura C.18. Hidrograma de escorrentía del evento número 18 (01-Jul.-04)

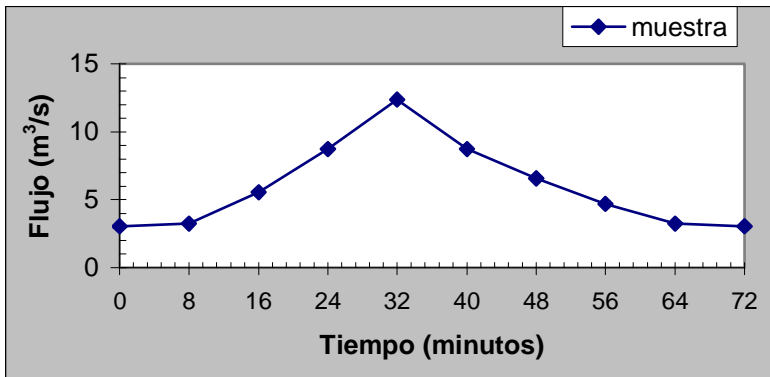


Figura C.19. Hidrograma de escorrentía del evento número 19 (02-Jul.-04)

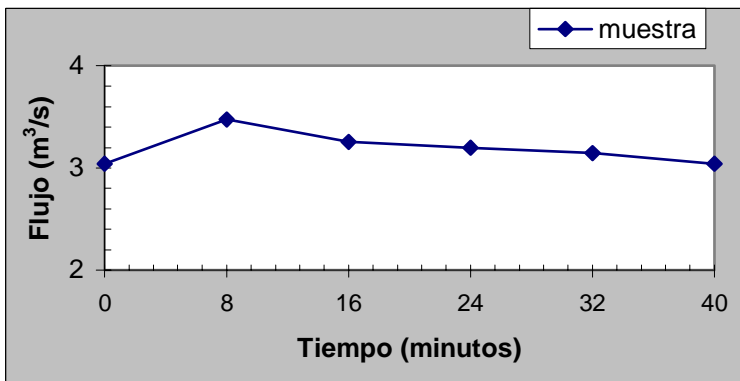


Figura C.20. Hidrograma de escorrentía del evento número 20 (11-Jul.-04)

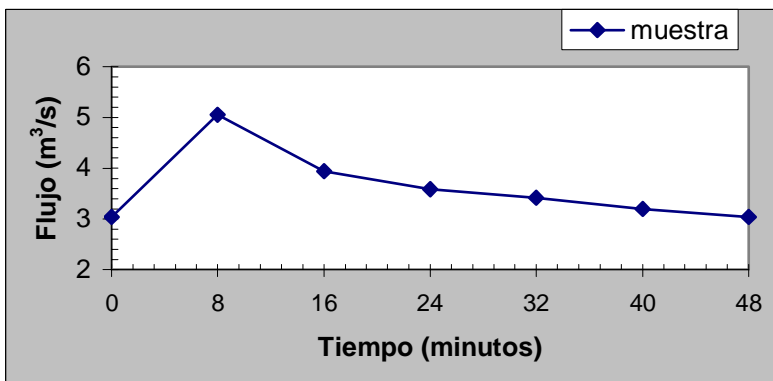


Figura C.21. Hidrograma de escorrentía del evento número 21 (15-Jul.-04)

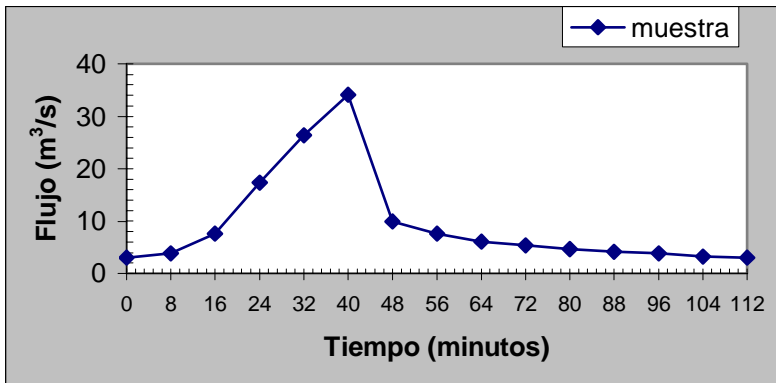


Figura C.22. Hidrograma de escorrentía del evento número 22 (20-Jul.-04)

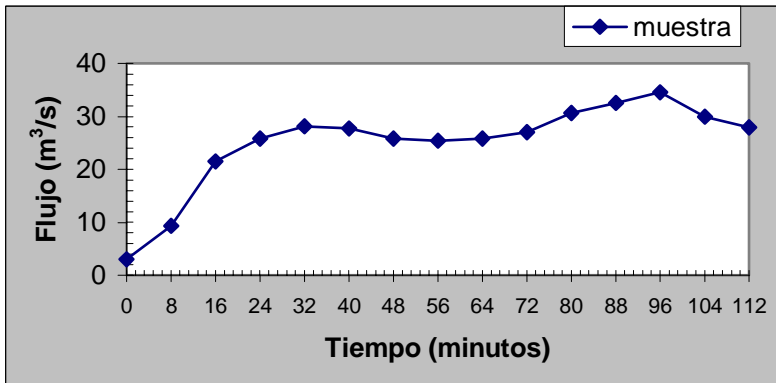


Figura C.23. Hidrograma de escorrentía del evento número 23 (23-Jul.-04)

Apéndice D

Flujo promedio diario y precipitación en micro cuenca Miraflores y Cerro Gordo

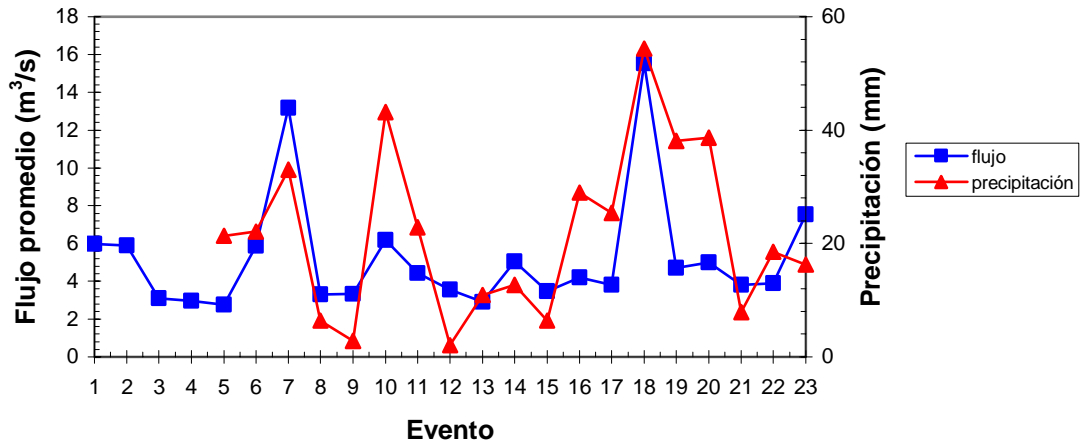


Figura D.1. Flujo promedio diario y precipitación en micro cuenca Miraflores en los eventos de tormenta monitoreados.

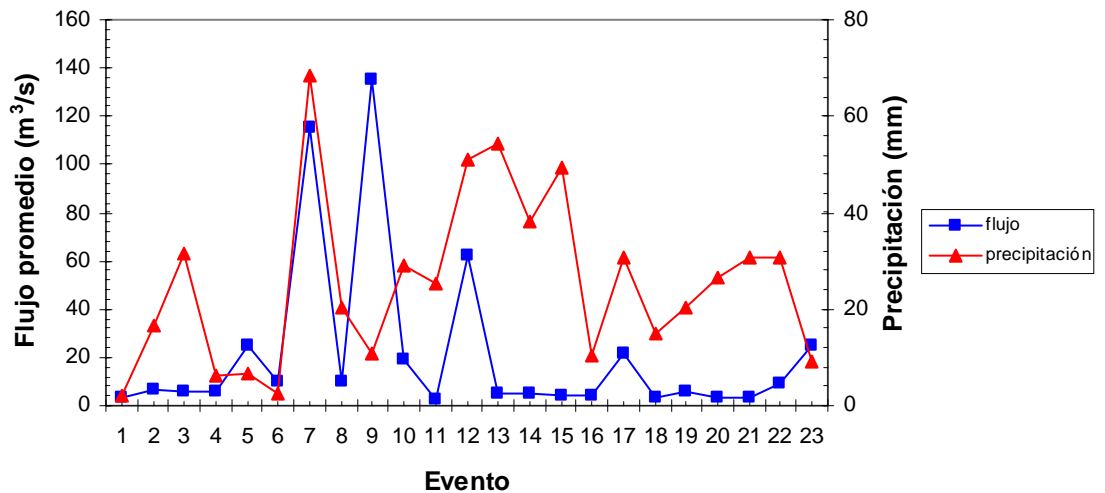


Figura D.2. Flujo promedio diario y precipitación en micro cuenca Cerro Gordo en los eventos de tormenta monitoreados.

Apéndice E

Reporte estadístico

----- cuenca=MI RAF-----

Pearson Correlation Coefficients, N = 23
Prob > |r| under H0: Rho=0

| | fl uj | ss | css | tp | ctp | dp | cdp | tkn | ctkn |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| fl uj | 1.00000 | 0.76334 | 0.93146 | 0.75700 | 0.84849 | -0.04642 | 0.82543 | 0.03411 | 0.46077 |
| | | <.0001 | <.0001 | <.0001 | <.0001 | 0.8334 | <.0001 | 0.8772 | 0.0269 |
| ss | 0.76334 | 1.00000 | 0.84103 | 0.46130 | 0.60704 | -0.39860 | 0.40028 | 0.52965 | 0.76326 |
| | <.0001 | | <.0001 | 0.0267 | 0.0021 | 0.0596 | 0.0584 | 0.0093 | <.0001 |
| css | 0.93146 | 0.84103 | 1.00000 | 0.79472 | 0.91823 | -0.27385 | 0.60769 | 0.15630 | 0.50699 |
| | <.0001 | <.0001 | | <.0001 | <.0001 | 0.2061 | 0.0021 | 0.4763 | 0.0135 |
| tp | 0.75700 | 0.46130 | 0.79472 | 1.00000 | 0.93795 | 0.01239 | 0.58679 | -0.32302 | 0.01811 |
| | <.0001 | 0.0267 | <.0001 | | <.0001 | 0.9552 | 0.0032 | 0.1327 | 0.9346 |
| ctp | 0.84849 | 0.60704 | 0.91823 | 0.93795 | 1.00000 | -0.11090 | 0.61714 | -0.14558 | 0.15777 |
| | <.0001 | 0.0021 | <.0001 | <.0001 | | 0.6144 | 0.0017 | 0.5075 | 0.4722 |
| dp | -0.04642 | -0.39860 | -0.27385 | 0.01239 | -0.11090 | 1.00000 | 0.47204 | -0.49387 | -0.51183 |
| | 0.8334 | 0.0596 | 0.2061 | 0.9552 | 0.6144 | | 0.0230 | 0.0166 | 0.0125 |
| cdp | 0.82543 | 0.40028 | 0.60769 | 0.58679 | 0.61714 | 0.47204 | 1.00000 | -0.27074 | 0.08197 |
| | <.0001 | 0.0584 | 0.0021 | 0.0032 | 0.0017 | 0.0230 | | 0.2115 | 0.7100 |
| tkn | 0.03411 | 0.52965 | 0.15630 | -0.32302 | -0.14558 | -0.49387 | -0.27074 | 1.00000 | 0.79807 |
| | 0.8772 | 0.0093 | 0.4763 | 0.1327 | 0.5075 | 0.0166 | 0.2115 | | <.0001 |
| ctkn | 0.46077 | 0.76326 | 0.50699 | 0.01811 | 0.15777 | -0.51183 | 0.08197 | 0.79807 | 1.00000 |
| | 0.0269 | <.0001 | 0.0135 | 0.9346 | 0.4722 | 0.0125 | 0.7100 | <.0001 | |

----- cuenca=CG-----

The CORR Procedure

Pearson Correlation Coefficients, N = 15
Prob > |r| under H0: Rho=0

| | fl uj | ss | css | tp | ctp | dp | cdp | tkn | ctkn |
|-------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| fl uj | 1.00000 | 0.25536 | 0.99348 | -0.14706 | 0.81759 | 0.05093 | 0.63949 | -0.27843 | 0.29496 |
| | | 0.2540 | <.0001 | 0.5196 | <.0001 | 0.8276 | <.0001 | 0.2161 | 0.1801 |
| ss | 0.25536 | 1.00000 | 0.38730 | 0.56356 | 0.35647 | -0.15172 | 0.15601 | 0.65477 | 0.84180 |
| | 0.2540 | | 0.0701 | 0.0010 | 0.1000 | 0.5080 | 0.5069 | <.0001 | <.0001 |
| css | 0.99348 | 0.38730 | 1.00000 | -0.0447 | 0.84848 | 0.04927 | 0.63654 | -0.1498 | 0.43402 |
| | <.0001 | 0.0701 | | 0.8780 | <.0001 | 0.8765 | 0.0010 | 0.5405 | 0.0401 |
| tp | -0.14706 | 0.56356 | -0.0447 | 1.00000 | 0.17221 | -0.30037 | -0.24993 | 0.64523 | 0.47677 |
| | 0.5196 | 0.0010 | 0.8780 | | 0.4472 | 0.1638 | 0.2644 | <.0001 | 0.0391 |
| ctp | 0.81759 | 0.35647 | 0.84848 | 0.17221 | 1.00000 | -0.13144 | 0.20142 | -0.0657 | 0.39723 |
| | <.0001 | 0.1000 | <.0001 | 0.4472 | | 0.5577 | 0.3520 | 0.7908 | 0.0701 |
| dp | 0.05093 | -0.15172 | 0.04927 | -0.30037 | -0.13144 | 1.00000 | 0.43528 | -0.2623 | -0.08788 |
| | 0.8276 | 0.5080 | 0.8765 | 0.1638 | 0.5577 | | 0.0493 | 0.2403 | 0.7053 |
| cdp | 0.63949 | 0.15601 | 0.63654 | -0.24993 | 0.20142 | 0.43528 | 1.00000 | -0.2240 | 0.24351 |
| | <.0001 | 0.5069 | 0.0010 | 0.2644 | 0.3520 | 0.0493 | | 0.3262 | 0.2800 |
| tkn | -0.27843 | 0.65477 | -0.1498 | 0.64523 | -0.0657 | -0.2623 | -0.2240 | 1.00000 | 0.68282 |
| | 0.2161 | <.0001 | 0.5405 | <.0001 | 0.7908 | 0.2403 | 0.3262 | | <.0001 |
| ctkn | 0.29496 | 0.84180 | 0.43402 | 0.47677 | 0.39723 | -0.08788 | 0.24351 | 0.68282 | 1.00000 |
| | 0.1801 | <.0001 | 0.0401 | 0.0391 | 0.0701 | 0.7053 | 0.2800 | <.0001 | |

Apéndice F

Regresiones lineales para micro cuenca Miraflores y Cerro Gordo ($P < 0.05$)

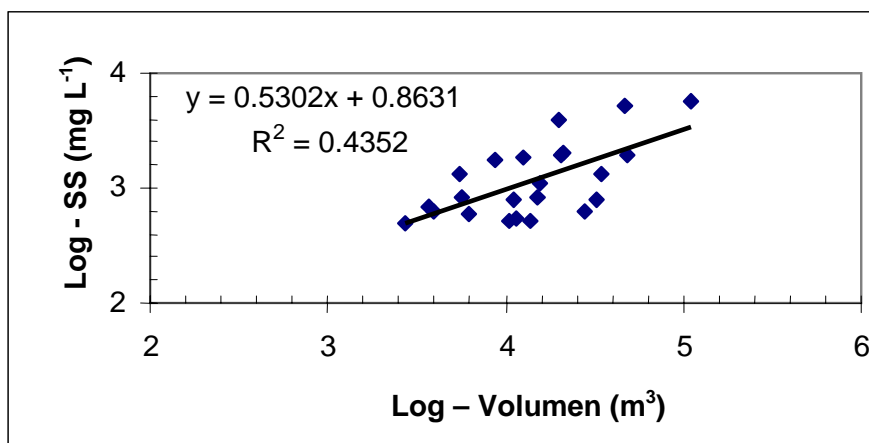


Figura F.1. Relación entre el volumen y sedimentos suspendidos durante eventos de tormenta en micro cuenca Miraflores.

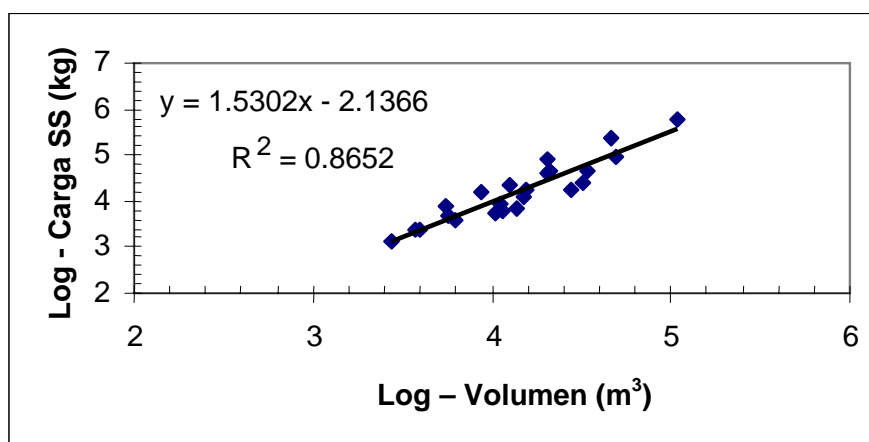


Figura F.2. Relación entre volumen y carga de sedimentos suspendidos durante eventos de tormenta en micro cuenca Miraflores.

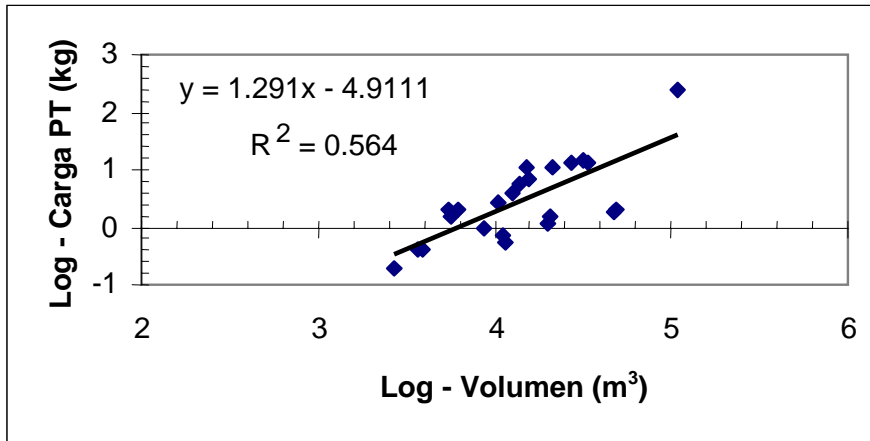


Figura F.3. Relación entre volumen y carga de P total durante eventos de tormenta en micro cuenca Miraflores.

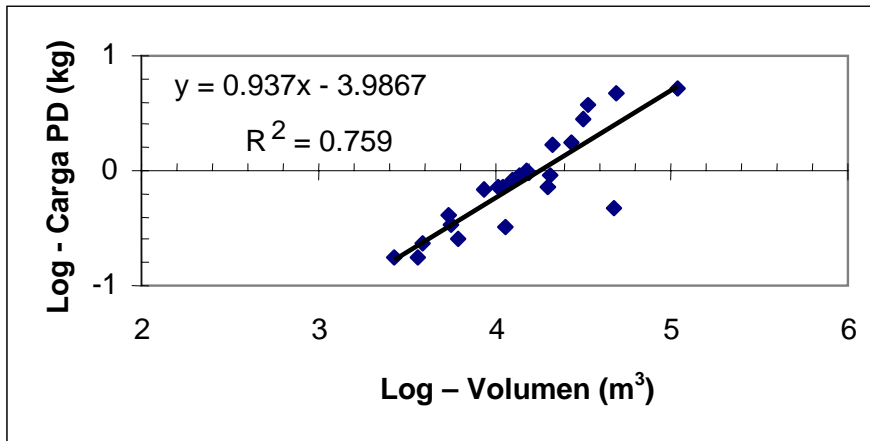


Figura F.4. Relación entre volumen y carga de P disuelto durante eventos de tormenta en micro cuenca Miraflores.

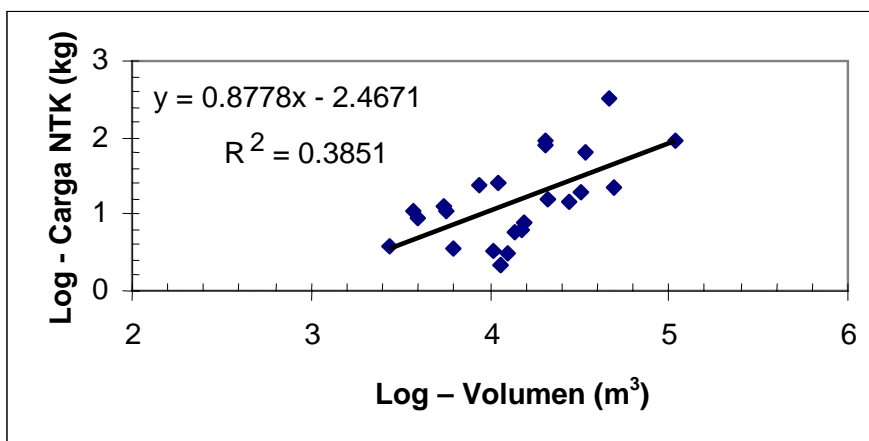


Figura F.5. Relación entre volumen y carga de N total Kjeldahl durante eventos de tormenta en micro cuenca Miraflores.

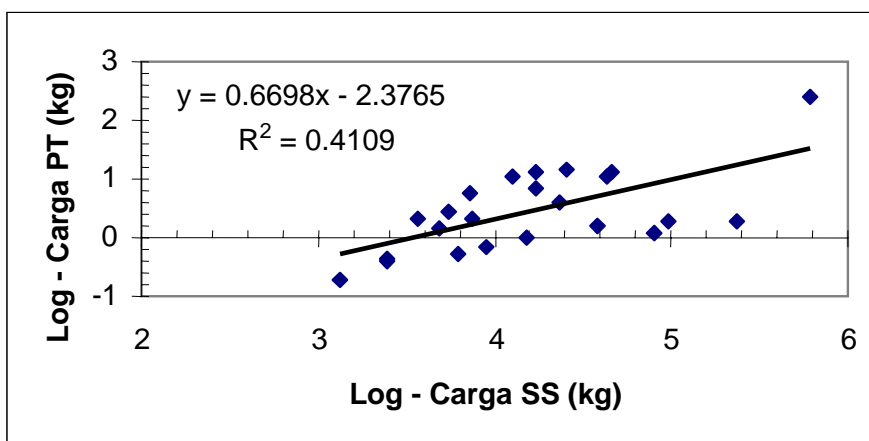


Figura F.6. Relación entre carga de sedimentos suspendidos y carga de P total durante eventos de tormenta en micro cuenca Miraflores.

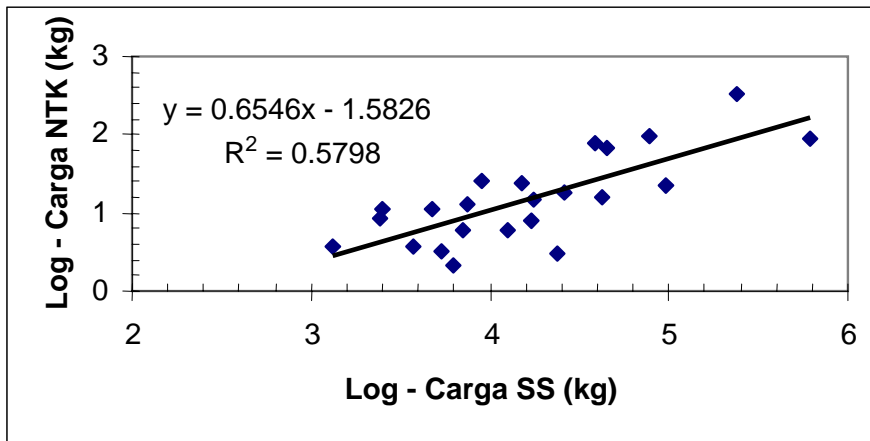


Figura F.7. Relación entre carga de sedimentos suspendidos y carga de N total Kjeldahl durante eventos de tormenta en micro cuenca Miraflores.

Regresiones lineales para micro cuenca Cerro Gordo ($P < 0.05$)

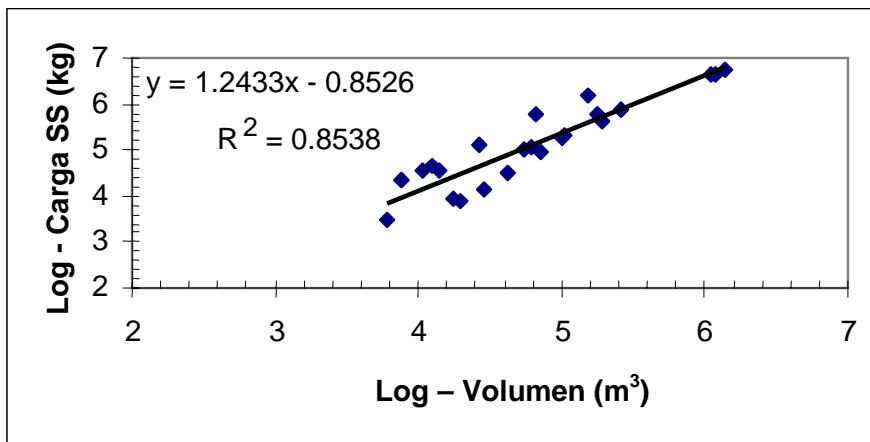


Figura F.8. Relación entre volumen y carga de sedimentos suspendidos durante eventos de tormenta en micro cuenca Cerro Gordo.

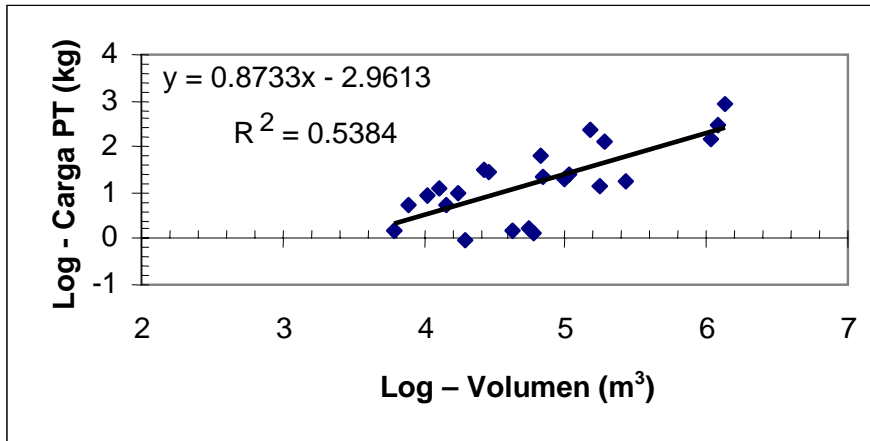


Figura F.9. Relación entre volumen y carga de P total durante eventos de tormenta en micro cuenca Cerro Gordo.

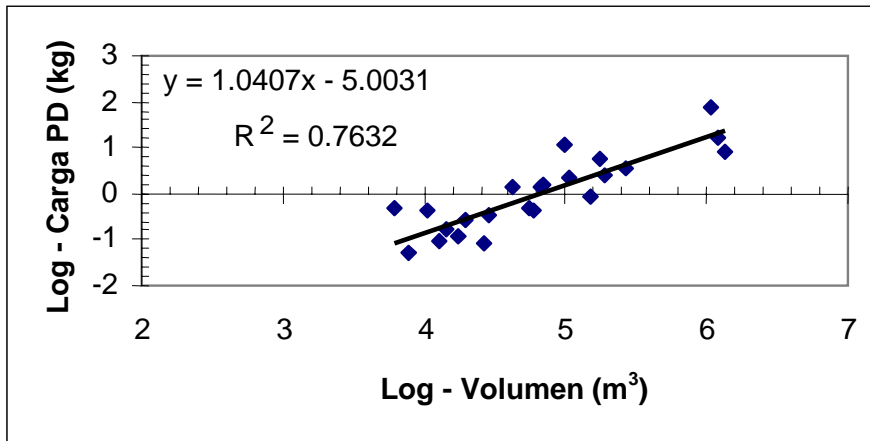


Figura F.10. Relación entre volumen y carga de P disuelto durante eventos de tormenta en micro cuenca Cerro Gordo.

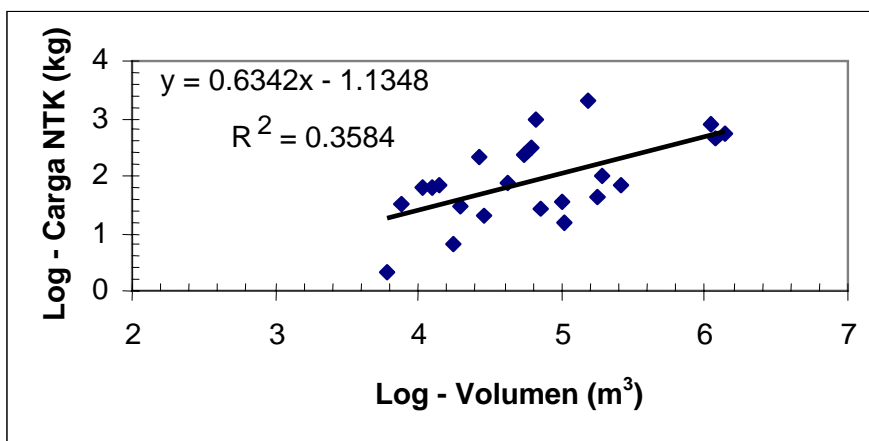


Figura F.11. Relación entre volumen y carga de N total Kjeldahl durante eventos de tormenta en micro cuenca Cerro Gordo.

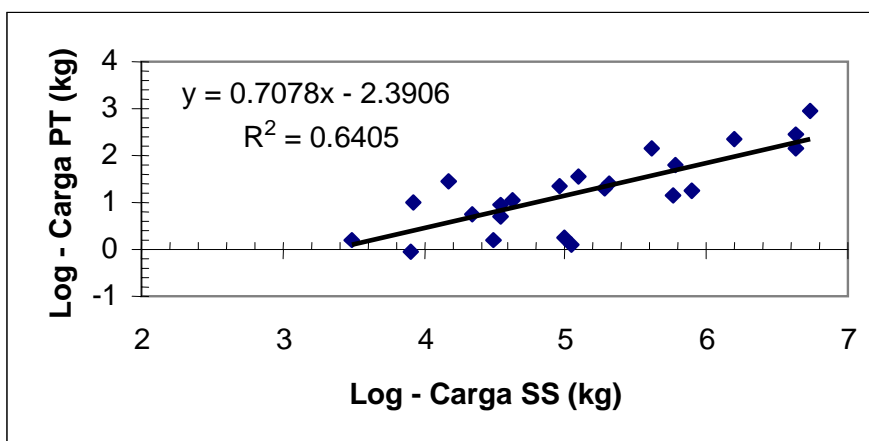


Figura F.12. Relación entre carga de sedimentos suspendidos y carga de P total durante eventos de tormenta en micro cuenca Cerro Gordo.

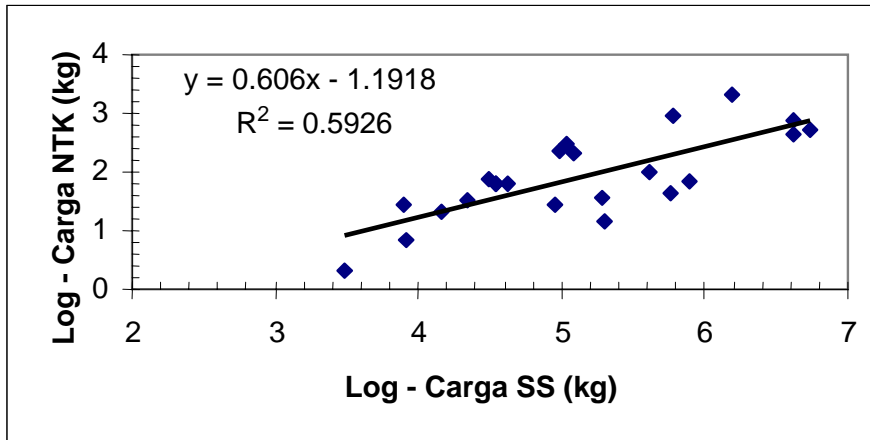


Figura F.13. Relación entre carga de sedimentos suspendidos y carga de N total Kjeldahl durante eventos de tormenta en micro cuenca Cerro Gordo.

Regresiones lineales para micro cuencas Miraflores y Cerro Gordo combinadas ($P < 0.05$)

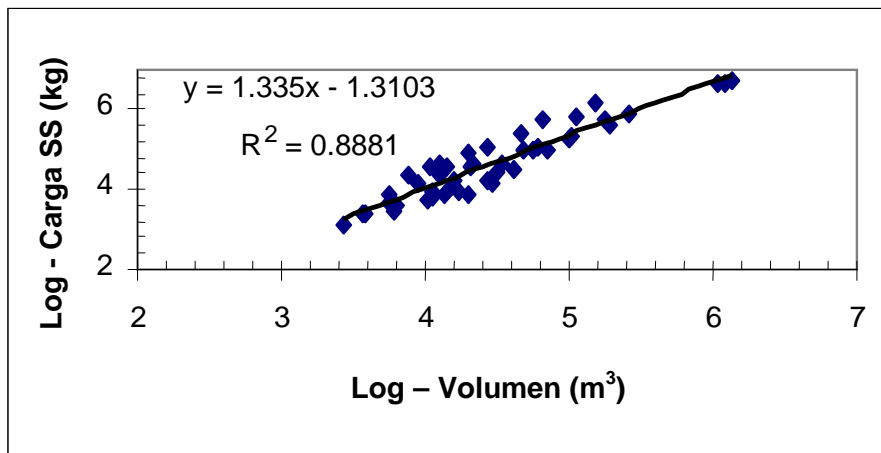


Figura F.14. Relación entre volumen y carga de sedimentos suspendidos durante eventos de tormenta en micro cuencas estudiadas.

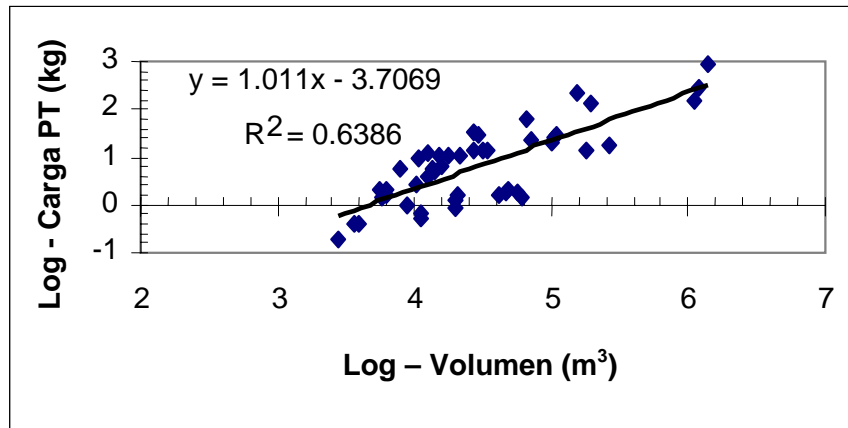


Figura F.15. Relación entre volumen y carga de P total durante eventos de tormenta en micro cuencas estudiadas.

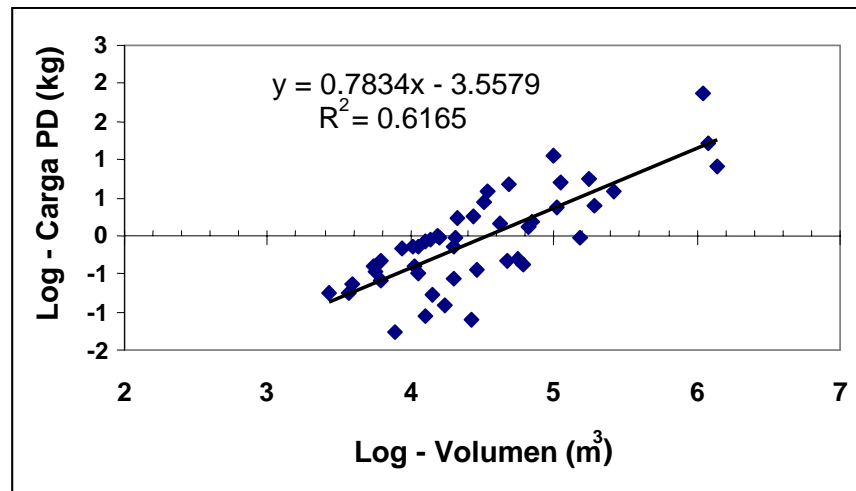


Figura F.16. Relación entre volumen y carga de P disuelto durante eventos de tormenta en micro cuencas estudiadas.

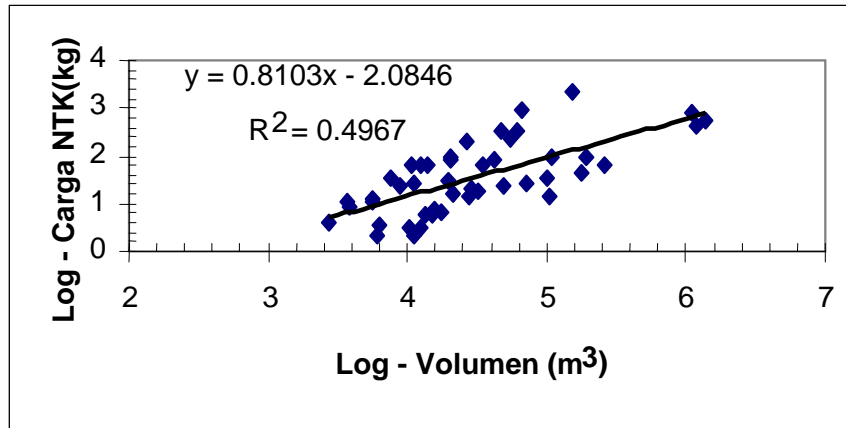


Figura F.17. Relación entre volumen y carga de N total Kjeldahl durante eventos de tormenta en micro cuencas estudiadas.

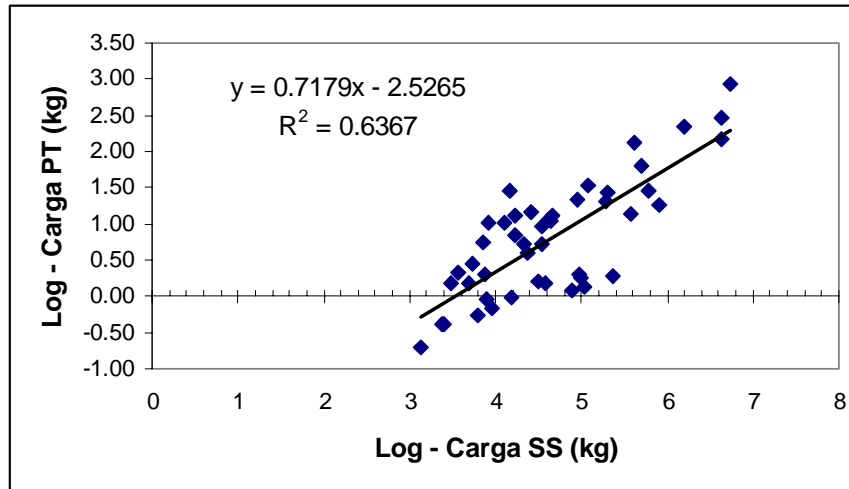


Figura F.18. Relación entre carga de sedimentos suspendidos y carga de P total durante eventos de tormenta en micro cuencas estudiadas.

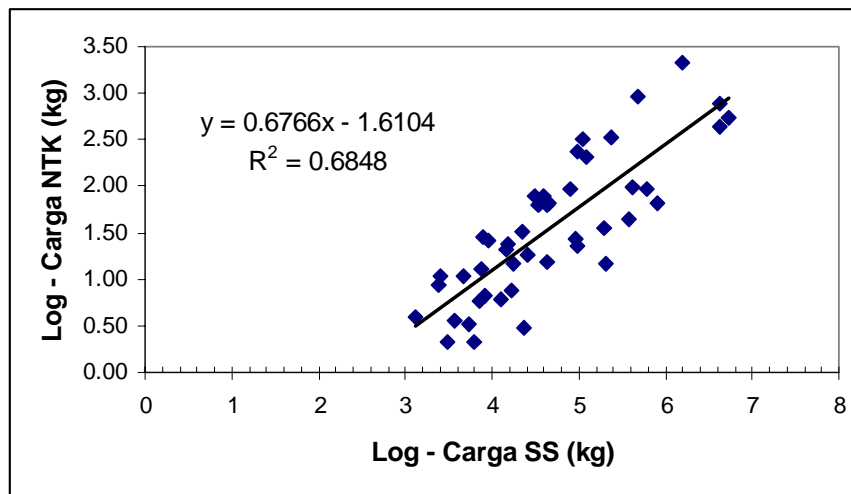


Figura F.19. Relación entre carga de sedimentos suspendidos y carga de N total Kjeldahl durante eventos de tormenta en micro cuencas estudiadas.

Regresiones lineales para micro cuencas Miraflores y Cerro Gordo en eventos coincidentes en día de muestreo.

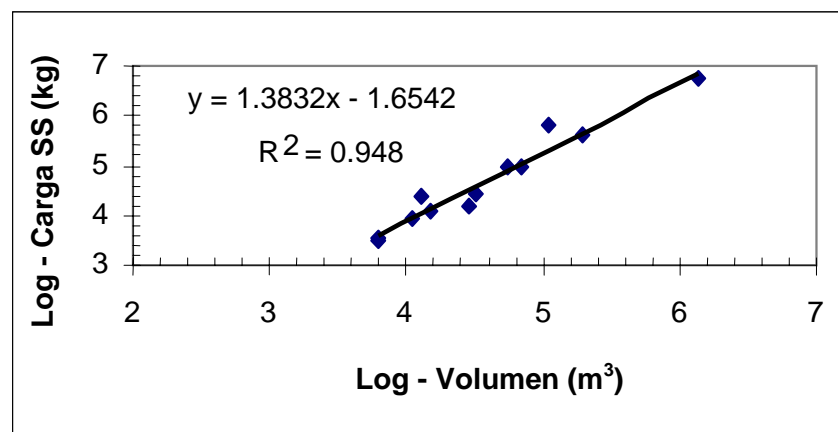


Figura F.20. Relación entre volumen y carga de SS en eventos coincidentes en día de muestreo.

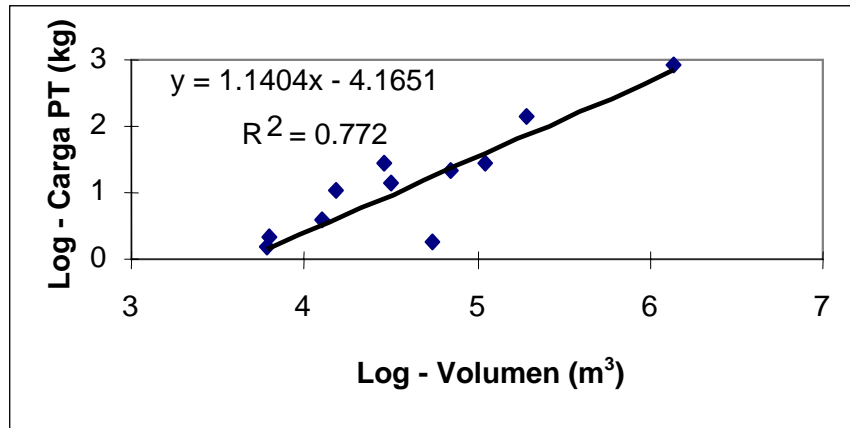


Figura F.21. Relación entre volumen y carga de PT en eventos coincidentes en día de muestreo.

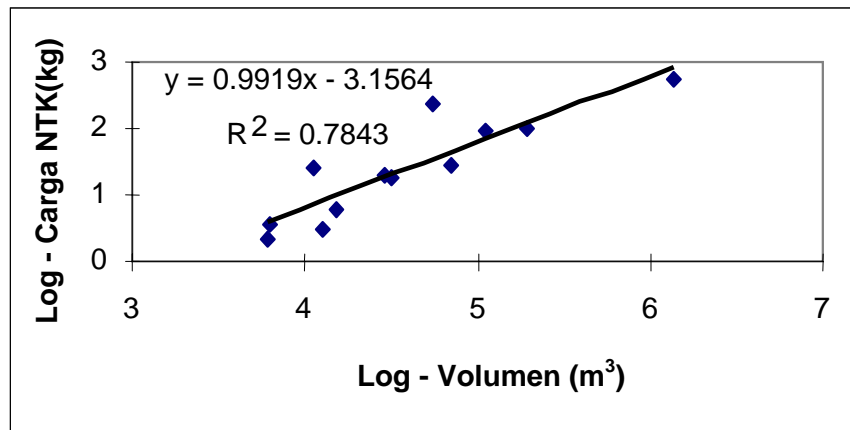


Figura F.22. Relación entre volumen y carga de NTK en eventos coincidentes en día de muestreo.

Apéndice G

Muestreo con botella fija I-CHEM®

Se instalaron tres muestreadores con botella fija I-CHEM® diseñados para muestrear a distintas alturas de la columna de agua en los eventos de tormenta. El equipo consta de un protector de PVC, en cuyo interior se encuentra una botella Nalgene® con capacidad de 1 litro, en la parte superior de ésta, cuenta con un mecanismo de cierre que impide la mezcla de la muestra después de llegar a su máxima capacidad. En el punto de cierre de la micro cuenca Cerro Gordo se instalaron 3 equipos de muestreo con botella fija para muestrear a 0.60, 1.2 y 1.80 metros de altura con respecto al fondo del canal, respectivamente (figura G.1.).



Figura G.1. Muestreo con botella fija en punto de cierre de micro cuenca Cerro Gordo

Con el muestreador de botella fija instalado a 0.60 metros se colectaron muestras de 4 eventos, los cuales pueden compararse con el muestreo de muestra compuesta de los equipos ISCO®. En la tabla G.1; se muestran los resultados comparativos entre ambos equipos para las concentraciones de SS, PT, PD y NTK.

Tabla G.1. Concentraciones de SS, PT, PD y NTK en eventos muestreados con muestreador I-CHEM® e ISCO®.

| Fecha evento | Equipo I-CHEM® | | | | Equipo ISCO® | | | |
|--------------|------------------|------|-------|------|--------------|------|-------|-------|
| | SS | PT | PD | NTK | SS | PT | PD | NTK |
| | -----mg L-1----- | | | | | | | |
| 27/jun/04 | 3190.4 | 1.15 | 0.01 | 7.69 | 10310.7 | 1.47 | 0.01 | 13.86 |
| 01/jul/04 | 3451.2 | 0.62 | 0.01 | 4.35 | 3383.7 | 0.94 | 0.01 | 4.94 |
| 02/jul/04 | 4478.2 | 2.03 | 0.003 | 8.41 | 4524.8 | 1.24 | 0.003 | 7.57 |
| 20/jul/04 | 3216.7 | 0.73 | 0.01 | 6.69 | 4100.6 | 0.94 | 0.02 | 13.89 |

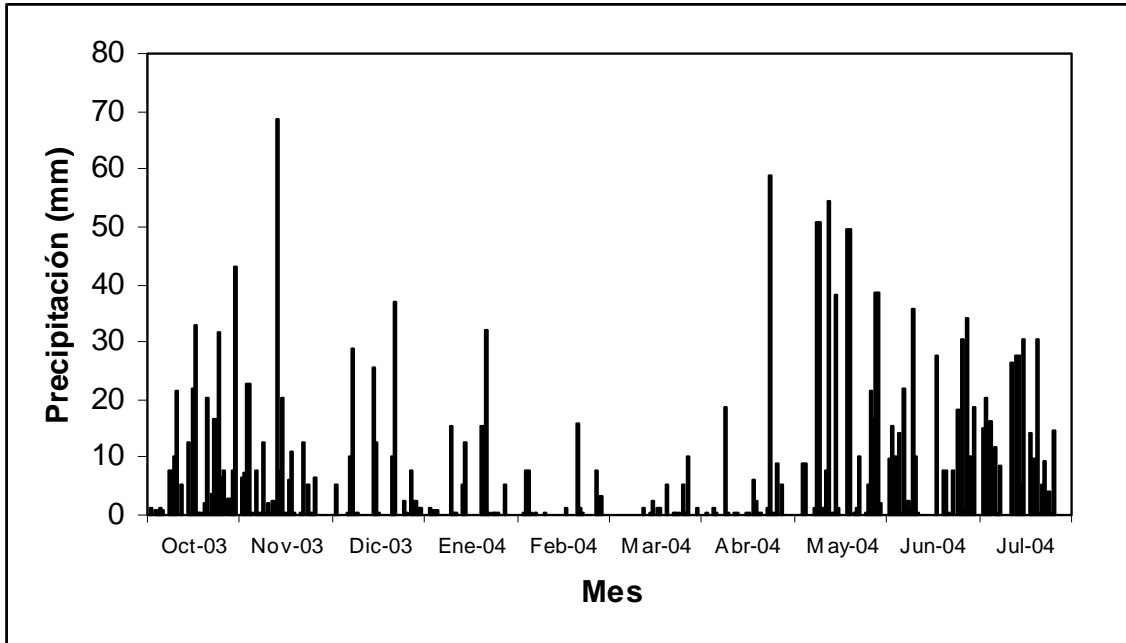
Apéndice H

Tabla H.1. Precipitación pluvial total (mm/día) durante el periodo de Octubre del 2003 a Julio del 2004. Información obtenida con pluviómetro instalado en el punto de cierre de la micro cuenca Miraflores.

| Día | Oct 2003 | Nov 2003 | Dic 2003 | Ene 2004 | Feb 2004 | Mar 2004 | Abr 2004 | May 2004 | Jun 2004 | Jul 2004 |
|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | 1.3 | <u>6.6</u> | 5.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 9.7 | <u>15.0</u> |
| 2 | 0.0 | 7.4 | 0.0 | 1.0 | 0.3 | 0.0 | 0.3 | 0.0 | 15.2 | <u>20.3</u> |
| 3 | 0.8 | <u>22.9</u> | 0.0 | 0.8 | 7.6 | 0.0 | 0.0 | 8.9 | 10.2 | <u>16.3</u> |
| 4 | 1.3 | 0.3 | 0.0 | 0.8 | 0.3 | 0.0 | 1.0 | 0.0 | 14.2 | 0.0 |
| 5 | 0.8 | 0.0 | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.3 | 0.0 | 0.3 | 11.9 |
| 6 | 0.0 | 7.6 | <u>10.2</u> | 0.0 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 22.1 | 0.3 |
| 7 | 0.0 | 0.5 | <u>29.0</u> | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.3 | 2.5 | 8.6 |
| 8 | 7.6 | 12.7 | <u>0.3</u> | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 18.5 | <u>50.8</u> | 1.3 | 0.0 |
| 9 | 10.2 | 0.5 | 0.0 | 15.2 | 0.3 | 0.0 | 0.3 | 1.3 | 35.6 | 0.0 |
| 10 | <u>21.3</u> | <u>2.0</u> | 0.0 | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.3 | <u>10.2</u> | 0.0 |
| 11 | 0.0 | 0.3 | 0.0 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 7.9 | 0.3 | <u>26.4</u> |
| 12 | 5.1 | <u>2.3</u> | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.3 | 0.3 | <u>54.4</u> | 0.0 | 0.0 |
| 13 | 0.0 | <u>68.6</u> | 0.0 | 5.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.3 | 0.0 | 27.7 |
| 14 | 12.7 | 7.6 | <u>25.4</u> | 12.7 | 0.0 | 0.5 | 0.0 | <u>38.1</u> | 0.0 | 5.1 |
| 15 | 0.5 | <u>20.3</u> | 12.4 | 0.0 | 0.0 | 2.5 | 0.0 | 1.3 | 0.0 | <u>30.5</u> |
| 16 | <u>22.1</u> | 0.5 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 17 | <u>33.0</u> | 6.1 | 0.0 | 0.0 | 1.3 | 1.3 | 0.0 | 0.0 | 27.4 | 0.0 |
| 18 | 0.3 | <u>10.9</u> | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.3 | 6.1 | 0.0 | 0.0 | 14.2 |
| 19 | 0.3 | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2.5 | <u>49.5</u> | 0.0 | 9.9 |
| 20 | <u>2.0</u> | 0.0 | 0.0 | 15.2 | 0.0 | 5.1 | 0.3 | 0.0 | 7.6 | <u>30.5</u> |
| 21 | 20.3 | 0.3 | 10.2 | 32.3 | 16.0 | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 0.3 | 0.3 |
| 22 | 0.3 | <u>12.7</u> | 37.1 | 0.5 | 1.3 | 0.0 | 0.0 | 1.3 | 0.0 | 5.1 |
| 23 | 3.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.3 | 0.3 | 1.0 | 10.2 | <u>7.9</u> | <u>9.1</u> |
| 24 | <u>16.5</u> | 5.1 | 0.0 | 0.5 | 0.0 | 0.3 | 58.9 | 0.0 | 0.0 | 4.1 |
| 25 | <u>31.5</u> | 0.3 | 2.5 | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.3 | 0.5 | 18.3 | 0.5 |
| 26 | <u>6.4</u> | <u>6.4</u> | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 5.1 | 8.9 | 5.1 | <u>30.5</u> | 14.5 |
| 27 | 7.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.3 | 0.0 | 21.3 | 0.8 | 0.0 |
| 28 | 0.0 | 0.0 | 7.6 | 5.1 | 7.9 | 10.2 | 5.3 | 16.8 | 34.3 | 0.0 |
| 29 | <u>2.8</u> | 0.0 | 2.5 | 0.0 | 3.3 | 0.0 | 0.0 | <u>38.6</u> | 10.2 | 0.0 |
| 30 | 7.6 | 0.0 | 1.3 | 0.0 | ---- | 0.0 | 0.0 | 2.0 | <u>18.5</u> | 0.0 |
| 31 | <u>43.2</u> | ---- | 1.3 | 0.0 | ---- | 1.3 | ---- | 0.0 | ---- | 0.0 |
| Total | 258.8 | 201.9 | 145.8 | 90.2 | 38.9 | 29.2 | 104.1 | 311.2 | 277.1 | 250.2 |

Los datos de precipitación sombreados corresponden a los eventos muestreados en la micro cuenca Miraflores y los datos sub rayados corresponden a los eventos muestreados en la micro cuenca Cerro Gordo.

Figura H.1. Distribución de la precipitación pluvial (mm/día) en el periodo de Julio de Octubre del 2003 a julio 2004. Información obtenida con pluviómetro instalado en el punto de cierre de la micro cuenca Miraflores.



Apéndice I

Lista de abreviaturas

| | |
|-----------|---|
| C1: | Peso del Coeficiente de Erosión del Suelo. |
| C2: | Peso del Coeficiente de la Clase de Escorrentía. |
| C3: | Peso del Coeficiente para Distancia al Cuerpo de Agua/ Franja de Amortiguamiento. |
| Ci: | Peso del Coeficiente para cada Característica de la Fuente Aportante. |
| CNTK: | Carga de Nitrógeno Total Kjeldhal. |
| CPD: | Carga de Fósforo Disuelto. |
| CPS: | Contenido de Fósforo en el Suelo. |
| CPT: | Carga de Fósforo Total. |
| CSS: | Carga de Sedimentos Suspendedos. |
| D: | Diferencia Significativa. |
| DOQQ: | Digital Orthophoto Quarter-Quadrangle. |
| HEC- RAS: | Hydrologic Engineering Center – River Analysis System. |
| IP: | Indice de Fósforo. |
| MED: | Modelo de Elevación Digital. |
| N: | Nitrógeno. |
| NA: | No Aplicable. |
| ND: | No hay Diferencia Significativa. |
| NFI: | Nivel de aplicación de Fertilizante Inorgánico. |
| NMO: | Nivel de aplicación de Material Orgánico. |

| | |
|------------------|---|
| NRCS: | Natural Resources Conservation Service. |
| NS: | No Significativo. |
| NTK: | Nitrógeno Total Kjeldhal. |
| P: | Fósforo. |
| PD: | Fósforo Disuelto. |
| PDR: | Fósforo Disuelto Reactivo. |
| ppm: | Partes por Millón. |
| PSW: | Distancia al Cuerpo de Agua/Nivel de Franja de Amortiguamiento. |
| PT: | Fósforo Total. |
| R ² : | Coefficiente de Determinación. |
| RC: | Clase de Escorrentía. |
| RUSLE: | Revised Universal Soil Loss Equation. |
| SC: | Nivel Asignado Según Características de la Fuente. |
| SE: | Nivel de Erosión de Suelo. |
| SIG: | Sistema de Información Geográfico. |
| SS: | Sedimentos Suspendidos. |
| SSURGO: | Soil Survey Geographic Database. |
| USDA: | United States Department of Agriculture. |
| USEPA: | United States Environmental Protection Agency. |
| USGS: | United States Geologic Survey. |
| UTM: | Universal Transverse Mercator. |
| WMS: | Watershed Modeling System. |