

ESTUDIO DE LA VULNERABILIDAD A LA EROSION DE LOS SUELOS EN ZONAS DEGRADADAS DE LA CUENCA MEDIA DEL RIO PAUTE

Esteban Pacheco¹, Fernando Cisneros, Isabel García y Pedro Cisneros¹

¹ PROGRAMA PARA EL MANEJO DEL AGUA Y SUELO (PROMAS), Universidad de Cuenca. Correo electrónico: fcisnero@ucuenca.edu.ec

RESUMEN

En el presente estudio se establece el grado de vulnerabilidad a procesos de erosión hídrica de los suelos mediante la determinación de índices de estabilidad de agregados IEA en 77 muestras para veinte sitios en áreas degradadas de la cuenca media del río Paute mediante el procedimiento de tamizado húmedo. Los resultados obtenidos establecen una potencial erodibilidad media de los suelos del orden de 40% con una variabilidad en IEA desde 0,17 para áreas erosionadas hasta 0,92 para áreas con mejores condiciones del suelo. El análisis apunta a una diferencia importante entre los efectos de plantaciones forestales con especies exóticas (*Pinus*, *Eucalyptus*), indicando una disminución en valores de IEA para plantaciones de pino del orden de 8% en comparación a los valores obtenidos para plantaciones con eucalipto.

Palabras clave: Índice de Estabilidad de Agregados, Especies forestales exóticas, Áreas degradadas

OBJETIVO

Establecer la vulnerabilidad a la pérdida de suelo en áreas degradadas de la cuenca media del río Paute mediante el análisis de índices de estabilidad de agregados.

INTRODUCCION

La investigación relevante a los procesos erosivos para zonas de montaña es insuficiente. Se desconoce los efectos que han tenido las intervenciones con especies forestales exóticas sobre el grado de vulnerabilidad a la erosión hídrica. La cuenca del río Paute ha sido objeto de numerosas intervenciones forestales, de manera especial durante los años 80 y 90 se estima una intervención en aproximadamente 11 500 hectáreas, y aunque se han efectuado estudios de cambios históricos de la cobertura vegetal (Wijffels, 2006), es incierto aún el efecto en las propiedades hidrofísicas y químicas de los suelos y sobre las tasas resultantes de producción de sedimento a escala de cuenca hidrográfica. La intervención humana sobre la tierra causa cambios en el comportamiento hidrofísico de los suelos, disminución de la infiltración, y cambios en el micro-relieve. Se considera pertinente ejecutar iniciativas de investigación en el ámbito de la erodibilidad de suelos y de su capacidad para resistir los procesos de erosión hídrica. En ecosistemas de páramo, los suelos poseen altos índices de estabilidad de agregados (Nanzyo et al., 1993; Wada, 1985) por lo cual poseen gran desarrollo de una estructura idónea para la permeabilidad. En la mayoría de suelos no volcánicos, la labranza incrementa el tamaño de los agregados como resultado del aumento del terronamiento, lo cual, no sucede en suelos volcánicos, debido a formaciones de complejos de carbón orgánico con formas amorfas de Fe y particularmente Al. Los suelos pueden resistir alteraciones en su estabilidad de agregados, hasta ciertos niveles de impacto por labranza (Tisdall y Oades, 1982; Shepherd et al., 2001) manteniéndose una infiltración y conductividad hidráulica alta. La labranza intensiva y otras prácticas, como las quemadas, pueden afectar gravemente la estabilidad del suelo, propiciándose la formación de agregados hidrofóbicos (Wada, 1985; Piccolo & Mbagwu, 1999), repelencia que depende de la cantidad y del tipo de la materia orgánica (Poulenard et al., 2001). En Andosoles Ecuatorianos, el ángulo de contacto del agua de suelos quemados puede aumentar de 50° a 90° (Buytaert et al, 2006). Aunque muchos estudios se han realizado en la determinación de relaciones entre erosión y estabilidad de agregados, es aún desconocido de manera satisfactoria las relaciones existentes en suelos tropicales, debido a las peculiaridades producto de altitud, pendiente, morfología y escala. Es muy difícil entender lo que

ocurre a escala de cuenca, sin haber logrado un adecuado entendimiento a escala de parcela (Cammeraat & Imeson, 1998). Los factores involucrados en el entendimiento de los procesos de erosión de suelos, deben ser entendidos en cuatro escalas de análisis (Poesen et al., 1996), que van desde 1mm^2 hasta cuenca hidrográfica. A nivel de microescala (Bryan, 1971), el papel de la estabilidad de los agregados tiene mayor influencia en la erodibilidad. Por otro lado, se ha indicado (Shainberg et al., 1997) que la tasa de desintegración de agregados, influye sobre la tasa de sellamiento de la superficie, mientras que el impacto de gotas de lluvia provoca la formación de agregados que son susceptibles de ser arrastrados por escorrentía superficial (Le Bissonnais, 1996). Adicionalmente (Barthes & Roose, 2002), afirman que la estabilidad de agregados serían un factor determinante en la formación final de erosión por surcos. Adicionalmente, la desintegración de los agregados no es el único mecanismo para erosión; también la escorrentía y el transporte por salpicadura contribuyen a la erosión de suelo (Barthes & Roose, 2002). (Cotler & Ortega, 2006), establece que a nivel de microescala, el proceso afecta el contenido de macro-agregados, mientras que a nivel de parcela el proceso afecta las características de la erosión. Aunque el tema de la erosión de los suelos en la cuenca del río Paute ha sido abordada ampliamente, al momento se desconoce sobre las reales tasas de producción de sedimento y su distribución espacial y temporal. Para la cuenca media del río Paute en ciertas zonas focalizadas se estiman tasas anuales de erosión del orden de 300 t/ha (Pacheco et al., 2007), muy superiores a los que se identifican para áreas conservadas, lo cual indica la necesidad de caracterizar de mejor manera los procesos que se dan en menor escala.

AREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a la cuenca del río Paute al sur del Ecuador. Su importancia radica en la producción de aproximadamente el 50% de energía hidroeléctrica del país a través del complejo hidroeléctrico Paute concebido para una generación de 1200 Mw. Su red hidrográfica principal la conforman los ríos: Tomebamba, Machángara, Tarqui, Yanuncay, Burgay, Jadán y Guacaleo, en una superficie de drenaje de 5176 Km^2 hasta el sitio de represamiento en Amaluzá que recibe anualmente un volumen aproximado de 2,4 millones de m^3 de sedimento principalmente proveniente de la erosión en la cuenca media que ocupa una superficie de $1783,8\text{ Km}^2$ e hidrográficamente se encuentra subdividida en tres sub-cuencas: Burgay con $454,7\text{ Km}^2$, Jadán con $338,3\text{ Km}^2$ y Gualaceo con $990,8\text{ km}^2$.

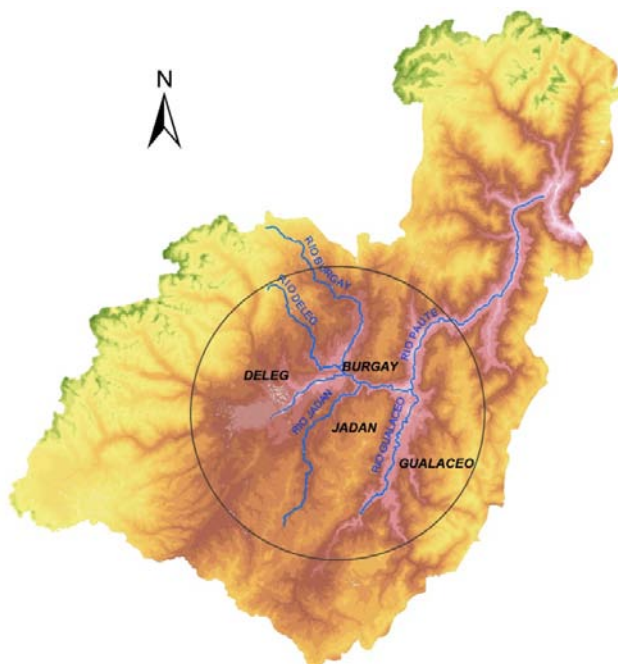


Figura 1. Zona de estudio.

De acuerdo a los estudios de geomorfología dinámica cuantitativa realizados con la metodología de la USLE (Universal Soil Loss Equation) en la cuenca media del río Paute (UMACPA, 1996; Zavgorodniaya, 1987) se pierde por erosión 9 678 903 t/año, que traducidas espacialmente corresponden a una tasa de 5 462 t/Km²/año. Estos valores constituyen los más altos de la cuenca. Le sigue en importancia la cuenca baja (1 758 Km²) con una pérdida por erosión de 3 996 999 t/año, que espacialmente representa una tasa de erosión de 2 274 t/Km²/año. El último lugar ocupa la cuenca alta (1 598 Km²) con valores de erosión 3 443 110 t/año, que corresponde a una tasa de erosión de 2 154 t/Km²/año. Investigaciones recientes (Pacheco et al., 2007) indican tasas de producción de sedimentos medias anuales muy variables para áreas degradadas de la cuenca del río Paute, como se puede apreciar a continuación:

Tabla 1. Producción de sedimentos en áreas degradadas (Pacheco et al., 2007).

Sitio	Superficie degradada (ha)	Sedimento anual (t a ⁻¹)	Producción específica (t ha ⁻¹ a ⁻¹)
Turupamba	88.14	406.35	4.61
Mapayacu(Tabacay)	60.00	15,802.91	263.38
Caldera	126.72	43,218.21	341.05

Sobre la base de la información referente a tasas de erosión, se consideró para el estudio, zonas pertenecientes a la cuenca media, en las subcuencas de los ríos Burgay, Jadán, Gualaceo y Yanuncay. Los sitios seleccionados se indican a en la siguiente Tabla:

Tabla 2. Unidades de estudio (Coordenadas con Datum PSAD 56).

Código	Sector	Subcuenca	X	Y
AY	AYANCAY	BURGAY	733500	9688700
CA	CALDERA	BURGAY	732279	9689420
DE	R. DELEG	DELEG	735460	9687462
EC	EMAC	JADÁN	729439	9672229
CONF	VIA CONFERENCIA	JADÁN	729500	9669900
QC	Q. CACHI	JADÁN	730550	9673428
EM	E. MAPAYACU	BURGAY	741500	9704200
FI	RAYOLOMA	CUENCA	726594	9679503
GO	GORDELEG	JADÁN	733200	9675500
J	JADÁN	JADÁN	738300	9683400
LL	LLAYZATAN	JADAN	739829	9682787

QT	Q. TURUPAMBA	BURGAY	734278	9697279
SH	SHIDMAD	JADÁN	735900	9676900
SIG	SIGUANCAY	JADAN	735900	9678000
SL	SOLANO	DELEG	730231	9689922
SM	S. MARTHA	BURGAY	737887	9689388
TA	TABACAY	BURGAY	742800	9706100
TU	TURI	YANUNCAY	721026	9677123
VE	VEGASPAMBA	JADÁN	736630	9682045
VLLA	DOMAY	BURGAY	729500	9687500

MATERIALES Y METODOS

Existen numerosos métodos para medir la estabilidad de agregados. El método estándar, es el método del NRCS Soil Survey Laboratory. El método empleado para la determinación de los índices de estabilidad de agregados fue el método Eijkelkamp (Eijkelkamp Agrisearch Equipment), de tamizado en húmedo. La estabilidad en agregados en húmedo, se determina con el principio de los que agregados inestables se disgregaran más fácilmente que agregados estables cuando son sumergidos en agua.

El equipo de tamizado en húmedo, es usado para determinar la resistencia de la estructura del suelo contra fuerzas mecánicas o contra fuerzas físico – químicas. El set estándar, incluye una máquina vibradora, con un motor eléctrico, apta para 8 tamices de 39 mm de diámetro, con recipientes de aluminio de 62.5 mm de diámetro por 44 mm. La apertura de tamiz es de 0.250mm y con una superficie de 10.2 cm².



Figura 2. Equipo Eijkelkamp para tamizado en húmedo.

Para determinar la estabilidad, 8 tamices son llenados con una porción de agregados de suelo. Estos tamices son ubicados en recipientes llenos de agua, los cuales son sometidos a vibración por un período de tiempo. Agregados inestables pasaran por las aberturas de los tamices y serán recolectados por las recipientes con agua que se encuentran bajo los tamices. Luego de este período de tiempo, los recipientes son removidos y reemplazados por nuevos recipientes con la solución dispersante para destruir los agregados restantes. Luego de secar los recipientes con los agregados, el peso de ambos

(agregados estables e inestables) pueden ser calculados. Para prevenir el encostrado de los agregados, cuando se ponen los tamices dentro de los recipientes con agua, los agregados son pre-humedecidos, usando un humidificador o un espray.

RESULTADOS Y DISCUSION

Adicionalmente a la determinación de IEA, se consideró como variables de interés el pH, y el porcentaje de materia orgánica (MO). Se caracterizó los sitios de muestras de acuerdo a la cobertura vegetal y litología. En la **Tabla 3** se indican los valores promedio obtenidos en las 77 muestras para determinación del IEA, los valores obtenidos para pH y porcentaje de materia orgánica MO, en los diferentes sitios de estudio. Se indica además la cobertura vegetal correspondiente (P=*Pinus*, E=*Eucalyptus*, SC=sin cobertura, T=testigo para la plantación).

Tabla 3. Resultados de análisis de estabilidad de agregados.

Muestra	Código	Cobertura	pH	MO%	IEA	Muestra	Código	Cobertura	pH	MO%	IEA	Muestra	Código	Cobertura	pH	MO%	IEA
1	ll-1	P	5.32	6.68	0.67	27	j-2	SC	8.44	NA	0.65	53	sm-6	T	7.5	2.55	0.51
2	ll-2	SC	5.78	NA	0.59	28	ll-4	P	5.34	6.13	0.64	54	sm-7	P	7.6	1.12	0.29
3	ta-1	P	6.81	NA	0.54	29	trp-2	E	4.33	NA	0.73	55	sm-8	T	7.8	0.29	0.42
4	ve-1	P	7.36	4.25	0.77	30	fi-2	E	8.3	2.43	0.64	56	sm-9	P	6.5	2.11	0.63
5	fi-1	E	8.47	2.28	0.67	31	sm-3	SC	7.3	1.84	0.55	57	sm-10	T	7.7	0.75	0.33
6	tu-1	E	6.43	4.7	0.62	32	ve-2	P	7.5	7.3	0.69	58	ec-9	P	6.9	2.9	0.64
7	sm-1	SC	6.9	NA	0.52	33	ca-1	SC	8.94	NA	0.17	59	ec-10	P	6.5	2.58	0.63
8	ec-1	SC	6.91	NA	0.7	34	trp-2	SC	2.85	NA	0.61	60	ec-11	T	6.8	0.93	0.7
9	j-1	E	7.93	4.3	0.68	35	j-2	SC	7.91	NA	0.41	61	ec-12	P	6.5	2.58	0.7
10	ec-2	E	5.33	3.2	0.73	36	ec-5	SC	7	NA	0.91	62	ec-13	T	6.7	1.57	0.7
11	de-1	E	8.11	3.9	0.92	37	ec-6	SC	6.9	NA	0.9	63	sm-11	P	6.8	1.86	0.47
12	sm-2	P	6.86	1.06	0.34	38	vlla	SC	8.6	NA	0.44	64	sm-12	T	8.3	0.12	0.46
13	ec-3	E	5.73	1.79	0.59	39	ec-7	E	5.67	1.8	0.72	65	sm-13	P	7.9	1.91	0.66
14	em-1	E	6.34	NA	0.8	40	conf-3	SC	6.7	NA	0.82	66	sm-14	T	8.2	1.37	0.43
15	ll-3	SC	6.52	NA	0.57	41	sl	SC	9.72	NA	0.33	67	sm-15	P	6	1.05	0.43
16	ec-4	E	5.39	3.24	0.74	42	conf-4	SC	7.12	NA	0.68	68	sm-16	T	8.1	0.75	0.35
17	go	SC	6.88	NA	0.65	43	conf-5	SC	7.5	NA	0.69	69	sm-17	P	8.1	1.77	0.52
18	conf-1	E	7.43	NA	0.74	44	em-2	E	6.49	NA	0.75	70	sm-18	T	8.7	0.32	0.43
19	sig	SC	7.79	NA	0.5	45	ca-2	SC	7.6	NA	0.32	71	ec-14	P	6.2	3.25	0.71
20	qc-1	SC	8.3	NA	0.59	46	ll-5	P	6.48	7.5	0.78	72	ec-15	T	6.9	1.63	0.72
21	sh	SC	6.47	NA	0.91	47	ec-8	SC	7.23	NA	0.81	73	ec-16	P	7	1.73	0.55
22	trp-1	E	4.11	NA	0.86	48	tu-2	E	5.25	NA	0.72	74	ec-17	P	6.98	NA	0.66
23	conf-2	SC	7.4	NA	0.66	49	de-2	E	6.6	5.57	0.83	75	ec-18	T	6.93	0.85	0.51
24	ay	SC	4.02	NA	0.86	50	ll-6	P	5.8	6.13	0.57	76	ec-19	P	5.9	1.13	0.6
25	qc-2	SC	8.15	NA	0.7	51	sm-4	SC	8.6	NA	0.47	77	ec-20	P	6.3	0.97	0.35
26	ta-2	E	6.85	24.7	0.78	52	sm-5	P	7.5	1.16	0.61						

En la **Figura 3** se indica espacialmente los rangos de los índices de estabilidad de agregados determinados, en toda la zona de estudio.

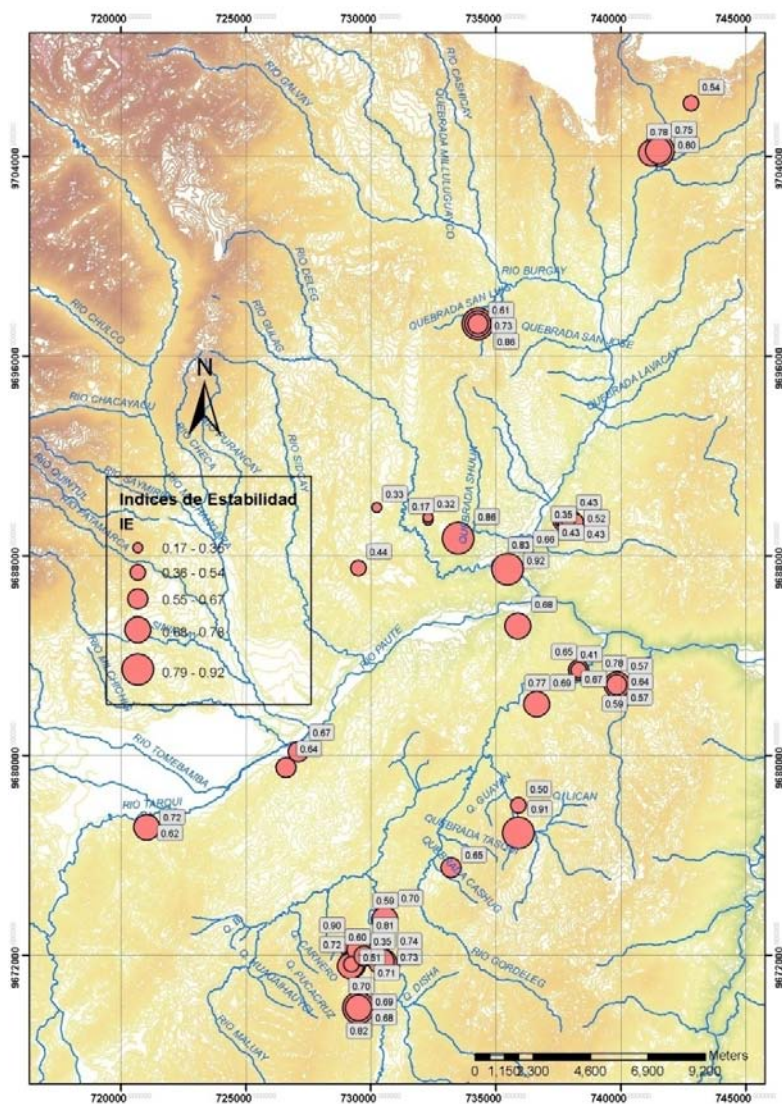


Figura 3. Índices de estabilidad de agregados en los diferentes lugares de estudio.

Para el análisis estadístico, se ha usado el programa R, que es un lenguaje (código abierto) y un entorno para cálculos estadísticos y gráficos. El análisis fue llevado para identificar: (i) Posibles correlaciones entre los parámetros considerados para el estudio y (ii) Distribución de los valores del índice de estabilidad de agregados.

Para las variables consideradas, se elaboró una matriz gráfica de posibles correlaciones entre pares. Del análisis de la matriz, se ha determinado como interesante considerar para la distribución de valores de índice de estabilidad de agregados las correlaciones existentes entre vegetación, pH y MO.

En función de lo establecido en la matriz gráfica de correlaciones, y considerando que la cobertura vegetal resulta uno de los parámetros influyentes en las condiciones del suelo, se ha analizado los resultados de los sitios con plantaciones forestales exóticas (*pinus*, *eucalyptus*). Se elaboró diagramas de caja (boxplot), mediante los cuales, se pueden visualizar la mediana, al mismo tiempo que varias características importantes del conjunto de datos (la dispersión, el alejamiento de la simetría, valores extremos).

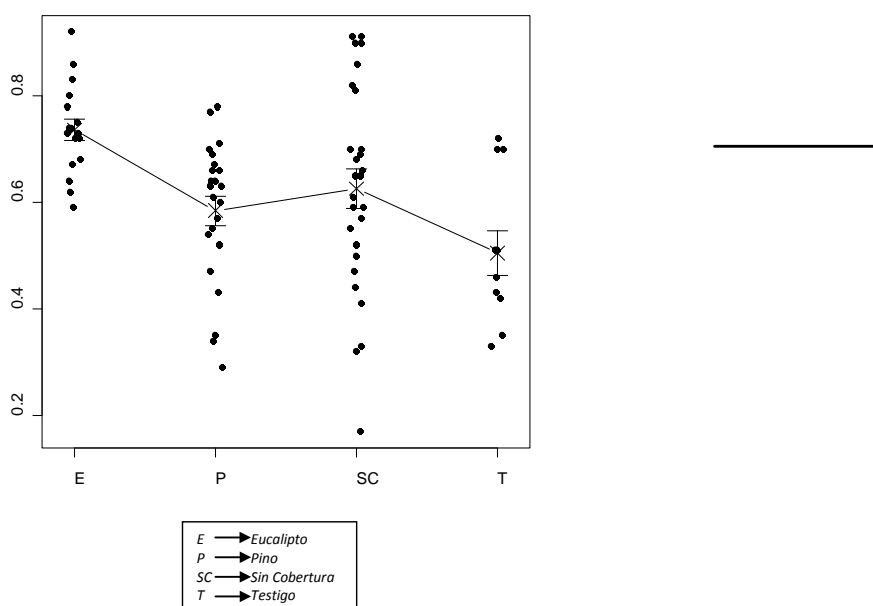


Figura 4. Distribución del IEA según Cobertura Vegetal

La distribución de la información con respecto a la media no presenta mayores asimetrías. Se aprecia en la **Figura 4**, que existe la posibilidad de una diferencia significativa del índice de estabilidad de agregados entre eucalipto y pino con respecto a los otros tratamientos. La mayor variabilidad obtenida para el caso del tratamiento sin cobertura y de testigo, es de cierta manera esperada, debido al sinnúmero de procesos adicionales que habría que contemplar y que influyen en el comportamiento final del suelo. El hecho de estar desprotegido, se traduce en mayor afectación no solo en las propiedades intrínsecas, sino en el comportamiento hidrofísico, por fenómenos como sellamiento, encostramiento y compactación. En la **Figura 5** *Distribución del IEA para Eucalipto y Pinose* observa, en forma de diagrama de caja, la diferencia clara que existe, entre los índices de estabilidad de agregados, bajo la cobertura vegetal de pino y del eucalipto.

CONCLUSIONES

- ✓ Se ha realizado la caracterización de los índices de estabilidad de agregados IEA en 77 muestras para zonas degradadas de la cuenca media del río Paute. Los valores obtenidos varían desde 0,17 en (La Caldera), hasta 0,92 en (Déleg), con un valor promedio de 0,61 que es indicativo de la potencial erodibilidad de los suelos en la magnitud de 39%, lo cual, contempla serias consideraciones para la implementación de medidas de control y manejo de la erosión en la cuenca hidrográfica.
- ✓ De los sitios analizados, se identifica como críticos: a) La Caldera, IEA=0,17, b) Santa Martha, IEA=0,29, c) Solano, IEA=0,32.
- ✓ Adicionalmente, se ha identificado diferentes grados de afectación en los índices de estabilidad de agregados con respecto a dos coberturas vegetales (*Pinus* y *Eucalyptus*). El estudio realizado, logra evidenciar que habría mejores condiciones de suelo con respecto al índice de estabilidad de agregados, para iniciativas de intervención forestales con eucalipto (*Eucalyptus*), con un valor medio IEA= 0,74; hecho que podría tener su explicación en los métodos de plantación y manejo de esta especie, que contempla densidad de siembra baja.

- ✓ El estudio revela, que las plantaciones forestales con pino, tendrían la tendencia a tener condiciones de suelo con índices de estabilidad de agregados más bajos, con un valor promedio de: 0,66, con una diferencia respecto al eucalipto de: 8%. Que podría explicarse debido a densidades de siembra más altas y a la adaptación de la especie al medio.
- ✓ El estudio da un aporte adicional, al identificar la necesidad de continuar con la investigación para el análisis de la influencia de factores de orden geomorfológico y de otras propiedades del suelo, como son: pH y contenido de materia orgánica MO.
- ✓ El establecimiento de índices de estabilidad de agregados, proporcionará valiosa información, que permitirá identificar de mejor manera acciones futuras para control de producción de sedimento dado que hasta el momento, no es conocido para la región ningún indicador que ayude a establecer el grado de erodibilidad de los suelos y el potencial de real producción de sedimentos en áreas degradadas.

BIBLIOGRAFIA

- Barthes, B., and E. Roose. 2002. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena* 47 , 133-149.
- Bryan, R.B. 1971. Considerations of soil erodibility indices and sheetwash. *Catena* 3, 99-111.
- Buytaert, W. 2006. Human impact on the hydrology of the Andean paramos. . *Earth Science Reviews* 79, 53-72.
- Cammeraat, L.H., and A. Imerson. 1998. Deriving indicators of soil degradation from soil aggregation studies in southeastern Spain and southern France. *Geomorphology* 23 , 307-321.
- Cotler, H., and P. Ortega. 2006. Effects of land use on soil erosion in a Mexican Tropical Dry Forest Ecosystem. *Catena* 65, 107-117.
- Eijkelkamp Agrisearch Equipment (Eijkelkamp Agrisearch Equipment).
<http://www.eijkelkamp.com/Products/tabid/76/CategoryID/18/List/1/Level/a/ProductID/89/Default.aspx>
- Le Bissonnais, Y. 1996. Agrégate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science* , 425-437.
- Nanzyo, M.S. 1993. Volcanic Ash Soils: genesis, properties and utilization. Elsevier, Amsterdam: Developments in Soil Science N_21.
- Pacheco, E., F. Cisneros, D. Mora, B. De Bievre, y G. Govers. 2007. Análisis de la variabilidad espacial y temporal de la producción de sedimento en la cuenca hidrográfica del río Paute. Congreso Internacional sobre Desarrollo Medio Ambiente y Recursos Naturales. Cochabamba, Bolivia: Publication of the Universidad Mayor de San Simón.
- Piccolo, A. 1999. Role of Hydrophobic Components of Soil Organic Matter in Soil Aggregate Stability. *Soil Science Society of America Journal* , 63: 1801–1810.
- Poesen, J., J. Boardman, B. Wilcox, and C. Valentin. 1996. Water erosion monitoring and experimentation for global change studies. *Journal of Soil and water Conservation* 55 , 386-390.

- Poulenard, J.P. 2001. Runoff and soil erosion under rainfall simulation of andisols from the Ecuadorian páramo: effect of tillage and burning. *Catena*, 45 , 185–207.
- Shainberg, I., L.G. Levy, and J. Levin. 1997. Aggregate size and seal properties. *Soil Science* 162 , 470-478.
- Shepherd, T.G. 2001. Tillage-induced changes to soil structure and organic carbon fractions in New Zealand soils. *Australian Journal of Soil Research* , 39: 465–489.
- Tisdall, J.M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science* , 33: 141–163.
- UMACPA. 1996. Informe del Estudio geomorfológico de la dinámica de los procesos erosivos y de sedimentación en la cuenca del Río Paute. Cuenca: Contrato de consultoría N. 4CO-003-96.
- Wada, K. 1985. The distinctive properties of Andosols. *Advances in Soil Science*, 2: 174–223.
- Wijffels A., y C. Tote. 2006. Descripción de los cambios en cobertura en las cuencas del río Paute y del río Chanchan en los últimos 20 años en base al análisis de imágenes Landsat. Informe Final, PROMAS-DIUC-Universidad de Cuenca, 40 p.
- Zavgorodniaya, S. 1987. Trabajos geomorfológicos cuantitativos en la cuenca media del Río Paute. Archivos de Fundación UMACPA.