



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Simulación de sedimentos mediante un modelo hidrológico distribuido utilizando información indirecta

Caso de estudio:
Cuenca del Río Grande, Antioquia

Santiago Osorio Yepes

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente
Medellín, Colombia
2016

Simulación de sedimentos mediante un modelo hidrológico distribuido utilizando información indirecta

Caso de estudio:
Cuenca del Río Grande, Antioquia

Santiago Osorio Yepes
Ingeniero Forestal

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería - Recursos Hídricos

Director:
Ph.D Jaime Ignacio Vélez Upegui

Co-director:
Ph.D (c) Nicolás Velásquez Girón

Línea de Investigación:
Sistemas Hidrológicos

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente
Medellín, Colombia
2016

Intentar es mucho más simple, y al mismo tiempo, infinitamente más complejo. Requiere imaginación, disciplina y propósito.

Carlos Castaneda

Dirección del autor

Santiago Osorio Yepes

Ingeniero Forestal

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente

Medellín, Colombia

e-mail: sosoriy@unal.edu.co

Agradecimientos

A mi familia por su apoyo incondicional durante cada paso que doy en el camino tras mis sueños.

A Nico por defender la divulgación libre de la información y compartir su conocimiento de manera desinteresada.

Al profe Nacho por actuar como un verdadero maestro de vida, mas allá de la academia.

Al profesor Carvajal por sus aportes durante el seminario de investigación.

A José Lino por sus aportes en la construcción del documento y su disposición para ayudarme.

A Juan José Montoya y Santiago Cataño por las discusiones que permitieron acentuar algunos conceptos importantes sobre este tema tan complejo.

A los compañeros del PARH: Susy, Daniel, Mateo, Max, Arley, Laura, Angie y Luna por los momentos compartidos y la motivación para cerrar este ciclo.

A Empresas Públicas de Medellín (*EPM*) por proporcionar la información necesaria para el desarrollo de este trabajo.

Resumen

La modelación distribuida se ha consolidado como uno de los instrumentos más útiles para la evaluación y el entendimiento del ciclo de sedimentos a escala de cuenca. No obstante, su aplicación se encuentra limitada por la falta de información para validar los resultados.

En este trabajo se reproduce y analiza la variabilidad espacio-temporal de los procesos sedimentológicos mediante la implementación de un modelo hidrológico distribuido bajo condiciones limitadas de instrumentación, donde no se cuenta con mediciones continuas de caudales sólidos. La zona de estudio comprende la cuenca del Río Grande, hasta su confluencia en el embalse Río Grande II, en el centro de Antioquia (Colombia). Los volúmenes de sedimentación en el embalse fueron utilizados para la validación del modelo sedimentológico.

Los resultados de la modelación permitieron identificar que las mayores tasas de producción de sedimentos se presentan durante los eventos de precipitación con alta intensidad. Adicionalmente, se determinó que el caudal sólido sigue un ciclo anual bimodal. Mediante un análisis de la distribución espacial de la producción de sedimentos se destaca que la conductividad hidráulica y la cobertura de los suelos son los factores más influyentes sobre los procesos erosivos en la cuenca de estudio.

Palabras clave: Modelación hidrológica, procesos sedimentológicos, información indirecta.

Abstract

Distributed modelling has become one of the most useful instruments to assess and comprehend the sediment cycle at basin scale. Nevertheless, its application is constrained by the lack of information to validate the results.

In the present research, the spatio-temporal variability of the sediment process is reproduced and analyzed through the implementation of a distributed hydrological model for limited instrumentation conditions, where continuous sediment load measurements are not available. The study area covers the Río Grande basin defined just upstream the Rio Grande II reservoir II, in the center of Antioquia (Colombia). The sedimentation volumes in the reservoir were used for the validation of the sedimentological model

The modeling outcomes allowed to identify that the higher sediment yield rates occur during high-intensity precipitation events. Furthermore, it was found that the sediment load follows an annual bimodal cycle. By analyzing the spatial distribution of sediment yield, it is highlighted that the hydraulic conductivity and the land cover are the factors with greater influence on the erosive processes in the study basin.

Keywords: Hydrologic modelling, sediment processes, proxy data.

Contenido

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
1. Introducción	2
1.1. Planteamiento del problema y objetivos	2
1.2. Contenido del documento	3
2. Marco conceptual	4
2.1. Procesos sedimentológicos	4
2.1.1. Procesos sedimentológicos en ladera	5
2.1.2. Procesos sedimentológicos en canales	6
2.2. Modelos sedimentológicos	9
2.2.1. Modelos empíricos	9
2.2.2. Modelos basados en procesos	10
2.3. Aprovechamiento de información indirecta	11
2.3.1. Sedimentación en embalses	11
3. Descripción del modelo	14
3.1. Definición del sistema	15
3.2. Procesos hidrológicos	16
3.2.1. Almacenamiento capilar (Tanque 1)	18
3.2.2. Almacenamiento superficial (Tanque 2)	19
3.2.3. Almacenamiento gravitatorio (Tanque 3)	21
3.2.4. Almacenamiento subterráneo (Tanque 4)	22
3.2.5. Almacenamiento en el cauce (Tanque 5)	22
3.3. Procesos sedimentológicos	25
3.3.1. Transporte de sedimentos en ladera	27
3.3.2. Transporte de sedimentos en canales	28
3.3.3. Depósito de sedimentos	30
3.4. Parámetros y calibración del modelo	30
3.5. Resultados del modelo	33

4. Zona de estudio	34
4.1. Localización	34
4.2. Topografía	35
4.2.1. Elevación	35
4.2.2. Pendientes	35
4.3. Geología	37
4.4. Suelos	38
4.5. Coberturas y usos del suelo	39
4.6. Información hidroclimática	41
4.6.1. Precipitación	41
4.6.2. Caudal	43
4.7. Información sedimentológica	44
4.7.1. Estudios relacionados	45
4.7.2. Información batimétrica	48
5. Implementación del modelo	53
5.1. Estimación de parámetros	53
5.1.1. Parámetros hidrológicos	53
5.1.2. Parámetros sedimentológicos	57
5.2. Modelación hidrológica	62
5.2.1. Calibración y validación	62
5.3. Modelación sedimentológica	67
5.3.1. Calibración y validación	67
5.3.2. Simulación de sedimentogramas	69
5.3.3. Distribución espacial de la producción de sedimentos	71
5.3.4. Producción de sedimentos en las cuencas abastecedoras	73
6. Conclusiones	75
6.1. Conclusiones	75
6.2. Limitaciones y futuras líneas de investigación	76
Bibliografía	78
A. Anexo: Ciclo anual de precipitación en las estaciones disponibles	84
B. Anexo: Sedimentogramas simulados	88

Lista de figuras

2.1. Capacidad de transporte vs. suministro de sedimentos.	4
2.2. Formas de transporte del sedimento en canales.	7
3.1. Esquema de acumulación del flujo.	15
3.2. Clasificación de celdas en el modelo.	16
3.3. Esquema conceptual de los procesos hidrológicos en el modelo.	17
3.4. Esquema conceptual de los procesos sedimentológicos en el modelo.	26
4.1. Localización de la zona de estudio.	34
4.2. Pendientes.	36
4.3. Unidades geológicas.	37
4.4. Unidades de suelos.	38
4.5. Coberturas y usos del suelo.	40
4.6. Ciclo anual de precipitación media en la cuenca de Río Grande.	42
4.7. Ciclo anual de caudal en las estaciones disponibles.	44
4.8. Estaciones de aforos instantáneos de caudal líquido y sólido.	46
4.9. Niveles batimétricos en el embalse Río Grande II	49
4.10. Cambios en la capacidad máxima del embalse.	50
5.1. Coeficiente de rugosidad de Manning (n).	54
5.2. Capacidad de almacenamiento capilar (S_{m1}).	55
5.3. Conductividad hidráulica del suelo (K_s).	56
5.4. Conductividad hidráulica del sub-suelo (K_p).	57
5.5. Textura del suelo.	58
5.6. Factor de erodabilidad del suelo (K).	60
5.7. Factor de coberturas (C).	61
5.8. Modelación hidrológica. Estación Q-1707. Periodo 2006-2010.	64
5.9. Modelación hidrológica. Estación Q-1707. Periodo 2001-2005.	64
5.10. Modelación hidrológica. Estación Q-1706. Periodo 2006-2010.	65
5.11. Modelación hidrológica. Estación Q-1522. Periodo 2006-2010.	65
5.12. Modelación hidrológica. Estación Q-1522. Periodo 2001-2005.	66
5.13. Calibración y validación del modelo sedimentológico.	68
5.14. Sedimentogramas simulados en el sitio Presa (2003-2006)	70
5.15. Ciclo anual del caudal sólido en el sitio Presa.	70

5.16. Erosión media (2001-2010)	72
A.1. Ciclo anual de precipitación en las estaciones disponibles.	85
A.1. Ciclo anual de precipitación en las estaciones disponibles.	86
A.1. Ciclo anual de precipitación en las estaciones disponibles.	87
B.0. Sedimentogramas simulados en el sitio Presa	89
B.0. Sedimentogramas simulados en el sitio Presa	90
B.0. Sedimentogramas simulados en la cuenca del río Grande	90
B.0. Sedimentogramas simulados en la cuenca del río Grande	91
B.0. Sedimentogramas simulados en la cuenca del río Chico	92
B.0. Sedimentogramas simulados en la cuenca del río Chico	93
B.0. Sedimentogramas simulados en la cuenca de la quebrada Las Animas	93
B.0. Sedimentogramas simulados en la cuenca de la quebrada Las Animas	94
B.0. Sedimentogramas simulados en la cuenca de la quebrada Don Diego	95
B.0. Sedimentogramas simulados en la cuenca de la quebrada Don Diego	96
B.0. Sedimentogramas simulados en la cuenca de la quebrada Oroabajo	96
B.0. Sedimentogramas simulados en la cuenca de la quebrada Oroabajo	97

Lista de tablas

3.1. Clasificación de los sedimentos en el modelo.	26
3.2. Factores de corrección para la calibración del modelo	32
4.1. Estaciones de precipitación	41
4.2. Estaciones de caudal	43
4.3. Correlación caudal líquido y sólido en la estación Q-1708	47
4.4. Producción media de sedimentos en la estación Q-1708	48
4.5. Capacidad máxima del embalse en cada campaña batimétrica.	50
4.6. Depósito de sedimentos en el embalse	51
4.7. Producción de sedimentos en el área afluente del embalse	52
5.1. Valores de referencia del criterio de Nash-Sutcliffe (NSE)	63
5.2. Calibración y validación del modelo hidrológico	67
5.3. Calibración y validación del modelo sedimentológico	68
5.4. Clases texturales del sedimento producido	71
5.5. Producción de sedimentos en las cuencas abastecedoras (2001-2010)	74