WORLD RESOURCES INSTITUTE

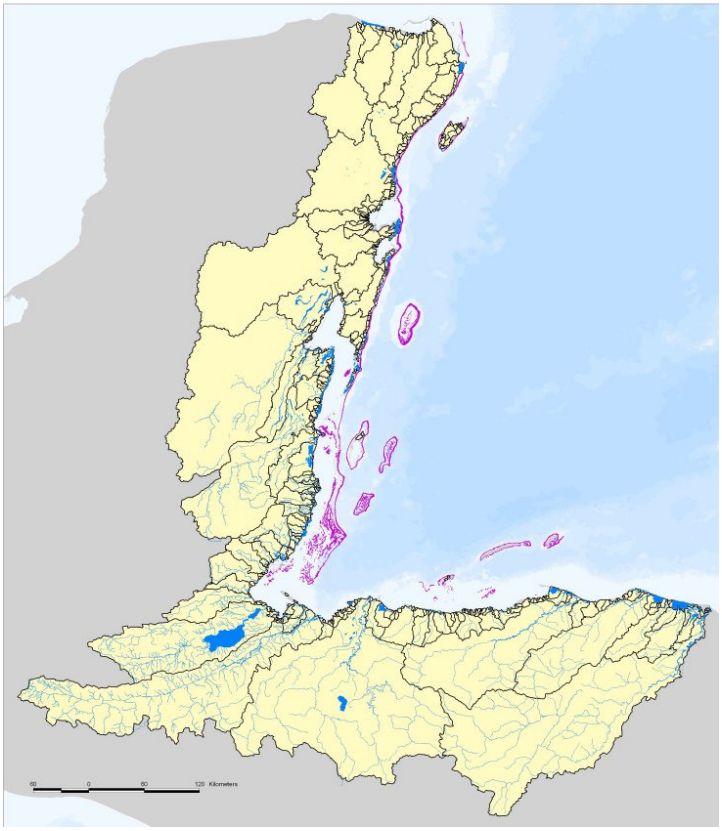
Hydrologic Modeling of Watersheds Discharging Adjacent to the Mesoamerican Reef

Analysis Summary - December 1, 2006

By: Lauretta Burke and Zachary Sugg

With analytical contributions from:
Will Heyman and Shin Kobara (Texas A& M University)
Laurent Cherubin, Christopher Kuchinke, Claire Paris, and Johnathan Kool (University of Miami)

Watersheds of the Mesoamerican Reef Region



Funded by:

USAID FROM THE AMERICAN PEOPLE

UNITED NATIONS FOUNDATION

Part of the ICRAN MAR Alliance:

ICRAN International Coral Reef Action Network

UNEP

CARIBBEAN ENVIRONMENT PROGRAMME

In partnership with:

WWF

UNEP WCMC

The ICRAN Mesoamerican Reef project was supported by the U.S. Agency for International Development (USAID) and the United Nations Foundation (UNF). The project is executed in conjunction with the United Nations Environment Program – Caribbean Environment Program (UNEP-CEP).

Collaborating on the watershed component of the ICRAN MAR partnership are WRI, UNEP – World Conservation Monitoring Center (WCMC) and the World Wildlife Fund (WWF).

Contents

Acknowledgments iv

Project Summary 1

Project Background 2

Key Findings 3

Overview of Methodology 6
- Watershed Delineation 6
- Hydrologic Modeling 8
- GIS Data Sets 9
- Modeling Erosion and Sediment Delivery 11
  - Precipitation and Rainfall Erosivity 13
  - Vulnerability of Land to Erosion 14
  - Modeling Runoff and Pollutant Delivery 14
- Circulation Modeling 15
- Model Calibration and Validation 16
- Limitations of the Analysis 19
  - Limitations of Hydrologic Modeling 20
  - Limitations of Circulation Modeling 20

Analysis Results 21
- 1. Sediment and Pollutant Delivery given Current Land Cover (2003/04) 21
- 2. Comparison of Results for Current Land Cover (2003/04) to Hypothetical Natural Land Cover 22
- 3. Comparison of Current Land Cover to Three Development Scenarios in 2025 23
- 4. Extreme Events 25
- 5. Buoyant Matter Transport along the MAR 26
- 6. Vulnerability of the Land to Erosion 29
- 7. Local Sources of Sediment and Nutrients 31

Conclusion 33

Additional Technical Notes 35

List of Figures

Figure A. Annual Sediment Delivery from MAR Watersheds 4
Figure 1. Watersheds of the Mesoamerican Reef Region 7
Figure 2. Soil Erosivity (K-factor) 12
Figure 3. Annual Precipitation Distribution 13
Figure 4. Rainfall Erosivity (R-factor) 13
Figure 5. Temporal Relationship Between N-SPECT River Discharge Estimates and the Mean Colored Detrital Matter (CDM) Absorption Coefficient from Imagery for the North of Honduras 19
Figure 6. Sediment and Nitrogen Delivery by Basin (for current land cover) 21
Figure 7. Modeled Sediment Delivery from "Current" and Hypothetical "Natural" Land Cover 23
Figure 8. Land Cover Distribution within each Scenario 24
Figure 9. CDM Plume Extent on November 14, 2000 26
Figure 10 Estimated Monthly River Discharge from N-SPECT 27
Figure 11. Simulated Buoyant Matter Concentration Along the MAR for December (Current Land Cover and Sustainability First Scenarios) 28
Figure 12. Maximum Annual Simulated Buoyant Matter Concentration Along the MAR (Current Land Cover and Sustainability First Scenarios) 28
Figure 13. Mesoamerican Reef Mapped by Buoyant Matter Concentration (Current Land Cover and Sustainability First Scenarios) 29
Figure 14. Vulnerability of Land to Erosion 30
Figure 15. Average Contribution of Sediment, Nitrogen, and Phosphorous by Sub-basin 31

List of Tables

Table 1. N-SPECT C-factor Coefficients 12
Table 2. N-SPECT Runoff Curve Numbers (Coefficients) by Land Cover Type and Soil Hydrologic Group 14
Table 3. Pollutant Coefficients for Phosphorous, Nitrogen, and Total Suspended Solids (TSS) 15
Table 4. Comparison of Natural and Current Land Cover (percent in each cover type) .. 22
Table 5. Comparison of Regional Results for Annual Model Runs for Current and Natural Land Cover 22
Table 6. Comparison of Land Cover Scenarios (percent in each cover type) 24
Table 7. Comparison of Regional Results for Annual Model Runs for Current Land Cover and Three Scenarios in 2025 25
Table 8. Percentage of Erosion, Nitrogen, and Phosphorous Sources by Country within MAR Drainage 32

List of Acronyms

CDM: Colored Detrital Matter
DEM: Digital Elevation Model
GEO: Global Environment Outlook
ICRAN: International Coral Reef Action Network
MAR: Mesoamerican Reef
N-SPECT: Nonpoint-Source Pollution and Erosion Comparison Tool
ROMS: Regional Ocean Modeling System
RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation
SeaWiFS: Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor
SOA: Spectral Optimization Algorithm
SOTERLAC: Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean
TSS: Total Suspended Solids
UNEP: United Nations Environment Programme
USAID: U.S. Agency for International Development
WCMC: World Conservation Monitoring Centre
WRI: World Resources Institute
WWF: World Wildlife Fund

Acknowledgments

This data CD was made possible through the generous contributions of the United Nations Foundation and the US Agency for International Development under the International Coral Reef Action Network (ICRAN) Mesoamerican Reef (MAR) project.

The World Resources Institute gratefully acknowledges the many partner organizations and colleagues who contributed to this project and the production of this data CD, including core ICRAN partners: UNEP-World Conservation Monitoring Centre (WCMC), and the World Wildlife Fund (WWF). Thanks to Emil Cherrington (Belize Coastal Zone Management Institute and Water Center for the Humid Tropics of Latin America and the Caribbean, CATHALAC) for data development and guidance on spatial data issues; Joep Luijten (consultant to UNEP-WCMC) and Lera Miles (UNEP-WCMC) for land-use scenario modeling; Eric van Praag (consultant to UNEP-WCMC) for facilitating the project's policy and training workshops; Liza Agudelo and Armeid Thompson (ICRAN MAR project); and Kristian Teleki and Nic Barnard (ICRAN) for encouragement and support throughout. Thanks to Will Heyman and Shin Kobara (Texas A&M University) for assisting with calibration of the hydrological model, and to Jamie Carter and Dave Eslinger (US National Oceanographic and Atmospheric Administration) for providing guidance on implementation of the N-SPECT model. Thanks to Claire Paris, Laurent Cherubin, Christopher Kuchinke, and Johnathan Kool (University of Miami) for adapting a circulation model to examine sediment dispersion along the Mesoamerican Reef; and to Nestor Windevoxhel and Alejandro Arrivillaga (The Nature Conservancy) for jointly supporting the circulation modeling. Thanks to Ramon Frutos (Belize Meteorological Department) for data on hurricane events and Jan Meerman (Belize Tropical Studies) for data on land cover and watersheds. Thanks to the World Bank / GEF Mesoamerican Barrier Reef System (MBRS) project for identifying N-SPECT as a useful tool. Thanks to Melanie McField (WWF and Smithsonian Institution) for constructive comments and guidance on impacts to the MAR; and Jose Vasquez, Sylvia Marin, Shalini Cawich and Gina DeFerrari (WWF) for their helpful collaboration under the ICRAN partnership. Thanks to Serge Andrefouet for provision of coral reef data for the MAR. Thanks to Suzie Greenhalgh, Daniel Prager, Janet Ranganathan, Isabel Munilla, and David Jhirad (WRI) for their valuable review and comments; and to Jenny Guiling (WRI) for provision of data for calibration of model results. Thanks to Ron Valenzuela (WRI) for editing the document and special thanks to Carolina de Rosas and Ruth Nogueron (WRI) for translating this paper into Spanish.

This data CD was made possible through support provided by the office of Guatemala-Central American Programs, U.S. Agency for International Development, under the terms of Grant no. 596-G-00-03-00163-00. The opinions expressed herein are those of the authors and do not necessarily reflect the views of the U.S. Agency for International Development or of UNEP.

Hydrologic Modeling of Watersheds Discharging Adjacent to the Mesoamerican Reef

Project Summary

This paper describes the methodology and results of a hydrologic analysis implemented by the World Resources Institute (WRI) as part of the International Coral Reef Action Network (ICRAN) Mesoamerican Reef (MAR) partnership. The objective of the analysis was to quantify the impact of human alteration of the landscape on land-based threats to the MAR to inform land-use planning, agricultural policy and practice, conservation priority setting, and risk mitigation efforts.

Over a two year period, WRI collaborated with many partners in the region to evaluate sediment and nutrients coming from land in over 400 watersheds that discharge adjacent to the MAR. The analysis evaluates the amount of sediment and nutrients (nitrogen and phosphorous) coming from each plot of land; the amount of eroded sediment and nutrients reaching the river mouth (coastal discharge point); and the amount of sediment reaching the reef. In addition, the analysis provides estimates of the increase in sediment and nutrient delivery resulting from human activities, and predictions of future sediment and nutrient delivery (in 2025) given varying land-use scenarios. This analysis is the first of this scope and level of detail for the MAR region.

The results provide a preliminary overview of regional patterns of sediment and nutrient runoff and delivery, and indicate how human alteration of the landscape can influence these patterns. To ensure that the project's results and analytical methods support action in the region, WRI makes the underlying data, analytical method, and modeling tools publicly available, and has conducted training sessions with users in the region. Based on this training, regional users can implement more detailed, focused analyses for smaller areas, calibrating them to local conditions.

All data used in the analysis and all model results, accompanied by metadata, are provided on the data CD, *Watershed Analysis for the Mesoamerican Reef*, WRI/ICRAN MAR project, 2006. This paper begins with background on the ICRAN MAR partnership and a summary of key findings, followed by a description of the analytical methodology and a summary of analysis results.

Project Background

Shared by Mexico, Belize, Honduras, and Guatemala, the Mesoamerican Reef (MAR), stretches over 1,000 km, and is the largest continuous reef in the Western Hemisphere. Alteration of the natural landscape for development, road construction, or agriculture can have adverse impacts on coral reefs through increased delivery of sediment, nutrients, and other pollutants to coastal waters. Threats from land clearing are higher in areas of steep slope, intense precipitation, and erosive soils.

Appropriate land-use practices in erosion-prone areas are essential for the management of watersheds to ensure that the transport of sediment, nutrients, and other pollutants to coral reefs is minimized. In the Mesoamerican region, over 300,000 hectares of land is allocated to the production of banana, oil palm, sugar cane, citrus, and pineapple crops. Eroded sediments as well as the residues of fertilizer and pesticides used in these industries drain through the rivers and streams and enter coastal waters along the Mesoamerican reef.

As part of the International Coral Reef Action Network (ICRAN) Mesoamerican Reef (MAR) project, the **World Resources Institute (WRI)** partnered with **UNEP-World Conservation Monitoring Centre (WCMC)** and the **World Wildlife Fund (WWF)** to provide comprehensive watershed analysis to complement the ICRAN MAR project's activities on Sustainable Fisheries and Sustainable Tourism.

The ICRAN MAR watershed analysis was developed to produce information and tools for examining the potential impact of different land use and development options in the region and the associated impacts on water quality on the MAR. The project aims to:

- Link patterns of land use within watersheds to the impacts at coral reefs, and identify reefs at greatest risk of degradation;
- Identify watersheds most vulnerable to erosion and those which contribute the most sediment and pollution to coastal waters;
- Adapt tools to forecast potential trends, evaluate different policy or development options, and facilitate improved land management within the region;
- Use the results of the models and diagnostic tools to help educate and encourage key stakeholders to adopt a suite of "better management practices" to reduce impacts on the coastal and marine resources.

The ICRAN MAR watershed project includes analytical components looking at land cover change and the associated impacts on runoff, erosion, and sediment and pollutant delivery to and transport within coastal waters. The project also includes on-the-ground activities with agricultural businesses to implement better management practices. Many local partners were consulted on modeling methods, for data input and evaluation, and on agricultural management practices. Three ICRAN partners collaborated on this effort:

- UNEP-WCMC – developed scenarios of land cover change and provided land cover data sets as input to the hydrologic modeling;

- WRI – implemented the watershed delineation and hydrologic analysis for the MAR region, performed analysis of vulnerability to erosion, and coordinated the circulation modeling along the MAR;
- WWF – led the work with agri-business to implement better management practices.

WWF's work with agricultural businesses focuses on reducing the presence of priority pesticides in the MAR marine environment and controlling soil erosion from major commercial agricultural sectors. WWF is working with business partners on banana, pineapple, citrus and sugar cultivation. The analysis performed under this project helps WWF and others to set priorities for targeting better land-management practices as well as to guide land-use planning.

Key Findings

This hydrologic analysis serves to integrate a wide range of data, and adapt modeling tools for an innovative, region-wide analysis for the MAR. The region-wide results presented in this paper should be considered preliminary and indicative of the overall pattern and magnitude of erosion and nutrient and sediment delivery across the region. An important aspect of the project is to provide these modeling tools to partners in the MAR region so that they might apply them at higher resolution to produce more detailed results for smaller areas within the MAR region. This approach will allow for refinement and better calibration of the model to local circumstances within the region.

The origin of sediments and nutrients reaching the MAR:

- Most of the sediment and nutrients delivered by watersheds along the MAR originate in Honduras. It is estimated that over 80% of sediment and over half of all nutrients (both nitrogen and phosphorous) originate in Honduras.

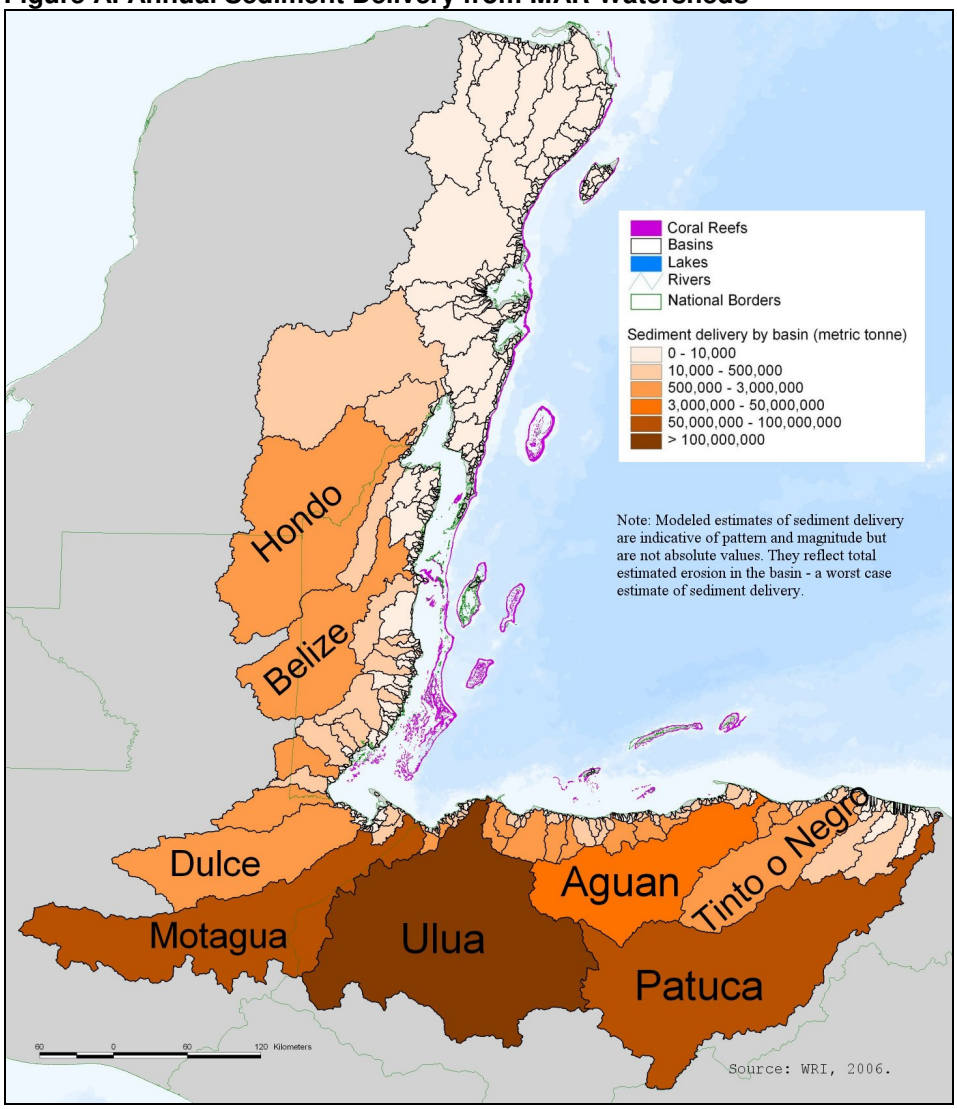
- Guatemala was identified as a source of about one-sixth of all sediments and about one-quarter of all nitrogen and phosphorous entering coastal waters along the MAR.

- The modeling suggests that compared to the other countries, relatively minor percentages of the regional sediment load come from Belize and Mexico. Belize contributes between 10-15% of nutrients and Mexico is estimated to contribute about 5%of the nutrients from all modeled watersheds. The estimate for Mexico is probably an underestimate, as the contribution of underground rivers is not included in this analysis.

- Of the 400 watersheds in the MAR region, the Ulua watershed in Honduras was found to be the largest contributor of sediment, nitrogen, and phosphorous. Other large rivers found to be significant contributors of sediment and nutrients are the

Patuca (in Honduras), Motagua (in Guatemala and Honduras), Aguan (in Honduras), Dulce (in Guatemala), Belize River (in Belize), and Tinto o Negro (in Honduras).

Figure A. Annual Sediment Delivery from MAR Watersheds



Runoff, erosion, and nutrient delivery to coastal waters are increasing:

- As a result of human alteration of the landscape, runoff and associated river discharge at river mouths has nearly doubled; sediment delivery at river mouths has increased by a factor of 20; nitrogen delivery has increased by a factor of 3, and phosphorous delivery by a factor of 7. (Ratios are based on model results for current (2003/04) land cover and on hypothetical natural (unaltered) land cover.)

The potential impacts of development and land-use paths are varied:

- Under land-use scenarios which favor free markets and little policy regarding the environment, nutrient delivery is likely to increase by about 10% by 2025, while sediment delivery might increase by 13% or more.

- If environmental policies that favor sustainable development are implemented, nutrient and sediment delivery are likely to be reduced by at least 5% from current levels, promoting recovery of degraded corals.

- Implementation of better agricultural management practices will yield additional reductions in sediment and nutrient delivery beyond those evaluated in this study, which has focused on the effect of changes in land cover.

Overview of Methodology

In collaboration with partners in the MAR region, WRI:

- implemented a watershed delineation for all land areas draining along the Mesoamerican reef;
- implemented a hydrologic analysis to examine sources of sediment and nutrients from this entire drainage area, as well as the delivery of sediment and nutrients to coastal waters;
- applied this hydrologic analysis tool to examine sediment and nutrient delivery for several land cover scenarios (current land cover, original or "natural" land cover, and three scenarios of land cover in 2025);
- provided outputs of the hydrologic analysis as inputs to a circulation model to examine sediment transport along the MAR; and
- collaborated with partners on calibration and validation of model results.

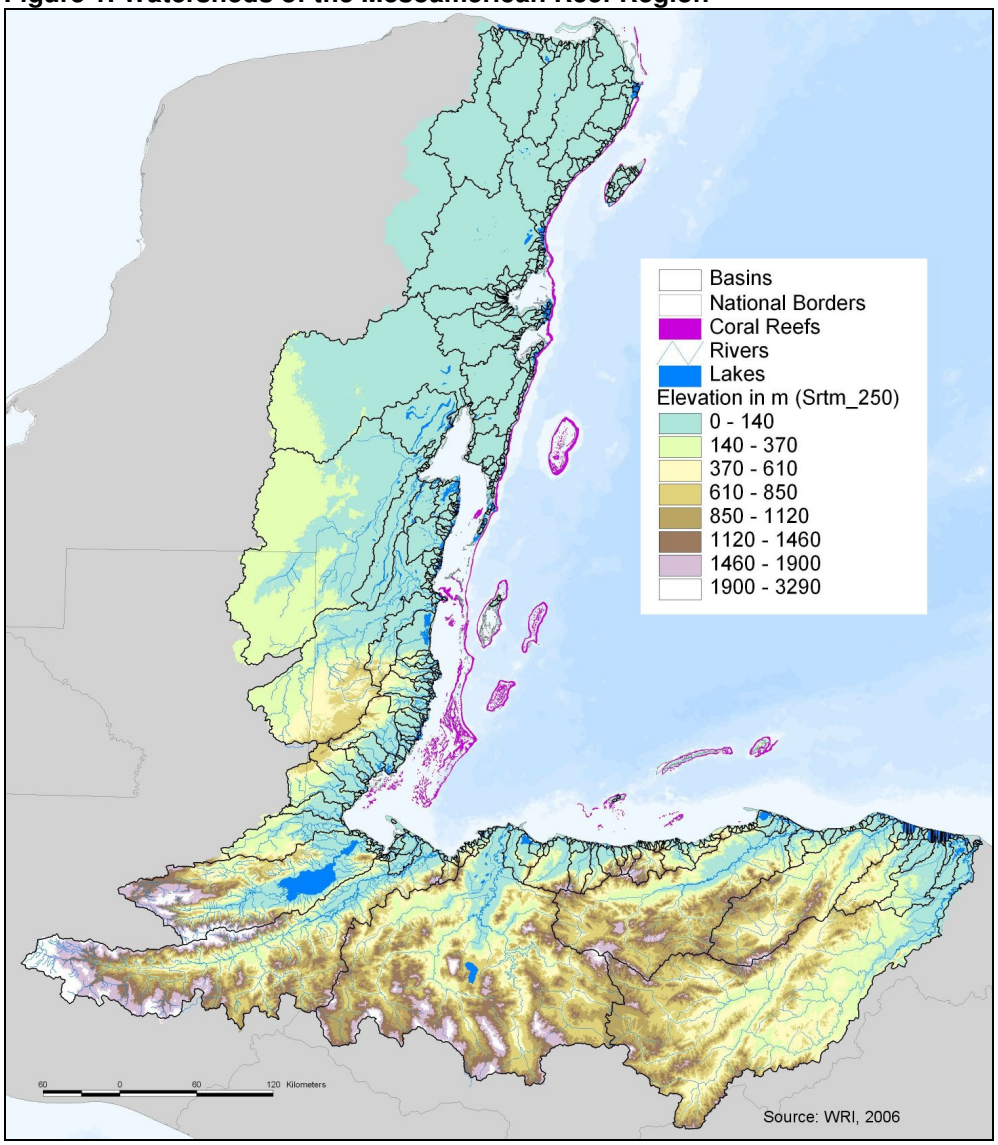
Watershed Delineation

Watersheds are an essential unit for this hydrologic analysis, as they serve to link a plot of land with its stream and river network, and its point of discharge to the sea. Watersheds were delineated from a hydrologically corrected 250m digital elevation model (DEM). This DEM is based on 90m resolution NASA Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) data, which were projected and resampled to 250m resolution for use in this project's land cover and hydrologic modeling. As elevation data from radar has inherent inaccuracies, such as capturing the tops of trees and buildings as part of the elevation, the elevation data needed some "correction" as part of the delineation process. Some mapped rivers and lakes were superimposed on the DEM through a process called "burning" the DEM. Rivers (as lines) from La Comision Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD) and lake and lagoon data (polygons) from WWF were used to develop a data set for correction of the DEM.[1] This grid was superimposed (as -20m elevation) into the DEM to ensure that water was forced to flow in these depressions. This "burned" version of the data set was used for basin delineation in the Environmental Systems Research Institute's (ESRI) ArcMap software. For each 250m grid cell in the DEM, the direction of water flow (FlowDirection) and the number of cells flowing into each cell (FlowAccumulation) was identified, as well as which cells comprise a basin (area draining to a single coastal point.) The 250m grid cell with the maximum flow accumulation in each basin was identified as the "pour point," or point of discharge to the sea. Basins of less than 5 km^2 area were excluded. Over 430 basins of at least 5 km^2 area were identified. (Some additional technical notes on watershed delineation can be found at the end of this report.)

[1] See metadata on *Watershed Analysis for the Mesoamerican Reef* data CD for data sources, as well as the GIS data set used for correction.

This final set of watershed delineations for the MAR region benefited from several rounds of review and the provision of additional data by several project partners. Delineations were again reviewed at the ICRAN MAR watershed workshop held in Belize in August 2006. The watershed delineations are reliable for most of the MAR region, but are inaccurate for the Yucatan, due to widespread karst topography with underground rivers and lack of perennial surface waters.

Figure 1. Watersheds of the Mesoamerican Reef Region



Hydrologic Modeling

Threat from land-based sources of sediment and nutrients was evaluated using the Nonpoint Source Pollution and Erosion Comparison Tool (N-SPECT), developed by the U.S. National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA). N-SPECT is a public-domain software which runs as an optional extension within ESRI's ArcMap software. N-SPECT combines information on the physical environment (elevation, slope, soils, precipitation, and land cover) to derive estimates of runoff, erosion, and pollutant sources (nitrogen, phosphorous and total suspended solids) from across the landscape, as well as estimates of sediment and pollutant accumulation and concentration in stream and river networks. N-SPECT was implemented at 250m resolution for the MAR region. Hence, N-SPECT evaluates each 250m resolution grid cell (6.25 ha area) for its contribution to runoff, sediment, and pollutant delivery within the watershed. The results of N-SPECT analyses are intended to be used as screening tools to help understand and predict the impacts of management decisions on water quality and, ultimately, on near shore coral reef health.

N-SPECT can be run to evaluate annual or event-based runoff, erosion, sediment, and pollutant delivery. It can also be modified to evaluate these outputs on a monthly basis. N-SPECT runs can either calculate the accumulation of runoff, sediment, and pollutants across the landscape (this is the standard run) or "local effects," meaning how much sediment, pollutant, or runoff comes from each individual grid cell. All of these options were employed in the analysis of land-based threat along the MAR.

a. **Annual runs** – For the MAR region, N-SPECT was applied to evaluate annual runoff, sediment, and nutrient delivery associated with several different land cover scenarios - current land cover (circa 2003/04), hypothetical "natural" land cover, and three scenarios of potential land cover in 2025. In these "annual" runs, N-SPECT was run with a consistent elevation, slope, soils, and annual precipitation. Only the land cover data set was varied so that the influence of land cover change on sediment and nutrient delivery could be evaluated.
b. **Monthly runs** – N-SPECT was also run using monthly precipitation data in order to derive monthly estimates of runoff and sediment delivery at river mouths, which are essential inputs to the circulation modeling for the region, which is implemented on a monthly time frame.
c. **Local effects / sources of pollution** – N-SPECT was run in "local effects" mode on current land cover (circa 2003/04) in order to evaluate how much sediment and nutrients (nitrogen and phosphorous) originate from each individual 250m grid cell independent of contributions from adjacent / upstream grid cells.
d. **Storm Events** – N-SPECT was also applied to examine the sediment and nutrient runoff and delivery associated with hurricanes in the region. This application using the "storm event" feature of N-SPECT, used the same elevation, slope, and soils data as the previous runs, as well as current land cover (circa 2003/04), but used local precipitation data for the multi-day storm events.

GIS Data Sets

All GIS data sets used in the hydrologic analysis are in Universal Transverse Mercator (UTM) projection (NAD1927 for Central America datum). All data inputs and model results are available on the data CD, *Watershed Analysis for the Mesoamerican Reef*, WRI / ICRAN MAR project, 2006.

Input Data sets used in the hydrologic analysis using N-SPECT were:

1. **Elevation** – a 250m resolution digital elevation model was derived from 90m resolution NASA Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) data.
2. **Soils** – Soils come from a vector (polygon) data set acquired from the Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean (SOTERLAC).
3. **Precipitation** – monthly precipitation data come from a 1 km resolution global raster precipitation data set called WorldClim[2], which reflects long-term average precipitation. Monthly precipitation data were summed to produce annual rainfall estimates. All precipitation data were converted to inches for use in N-SPECT.
4. **Land Cover –** five representations of land cover were used to allow for evaluation of the effect changes in land cover have on sediment and nutrient delivery to river mouths along the MAR.
    - **"Current" Land Cover –** National "Ecosystem Maps" for Mexico, Guatemala, and Honduras (2003) and Belize (2004) were used as the basis of the current land cover map. Data were merged for the four countries and gridded at 250m resolution.[3]
    - "**Natural" Land Cover** - "Original" or natural land cover for Belize, Guatemala, and the Yucatan comes from a vector data set by Pronatura on "Original land cover." [4]

Land Cover in 2025. Three land cover change maps from 2005 to 2025 were developed for the MAR region, based on the Markets First, Policy First, and Sustainability First scenarios from the UNEP Global Environment Outlook (GEO)

---

[2] See 2005. Very High Resolution Interpolated Climate Surfaces for Global Land Areas. (14 pages) Description of the development of the WorldClim global climate data set. In *International Journal of Climatology. Robert J. Hijmans, et al*. on *Watershed Analysis for the Mesoamerican Reef* data CD, WRI / ICRAN MAR project, 2006.

[3] Some "nodata" cells for land cover along the coast were filled in based upon the land cover class of the nearest land cover cell. In addition, some locations were recoded as "water" based on data from Pronatura on waterbody locations in Belize, Guatemala, and the Yucatan.

[4] Land classes have been reclassified to match the classes used in the ICRAN MAR watershed analysis, and gridded at 250m resolution. For Honduras, the Ecosystem map of Honduras (2003) was modified as follows - "Cultivated" and "Developed" land cover was reclassified based on the adjacent land cover type, with the exception of water (not allowed to expand) and mangrove (only allowed to expand if below 20m elevation).

process.[5] The scenarios envisage differing social, political, and economic trajectories, emphasizing outcomes for the environment and human well-being.

- "**Markets First" scenario of land cover in 2025** – In this market-oriented development scenario based on the GEO Market First Scenario for Latin America, most of the world adopts the values and expectations prevailing in today's industrialized countries. The wealth of nations and the optimal play of market forces dominate social and political agendas. Public policy is geared toward supporting commercial interests and promoting the open exchange of goods and services. Social and environmental policies receive little attention or financial support, for it is assumed that economic growth is in itself a sufficient route to progress. This scenario sees the greatest rate of agricultural expansion. The 250m resolution land cover data reflecting this scenario were developed at UNEP-WCMC.
- "**Policy First" scenario of land cover in 2025** – In this scenario based on the GEO Policy First Scenario for Latin America, decisive initiatives are taken by governments in an attempt to reach specific social and environmental goals. A coordinated pro-environment and anti-poverty drive balances the momentum for economic development at any cost. Environmental and social costs and gains are factored into policy measures, regulatory frameworks, and planning processes. All these are reinforced by fiscal levers or incentives such as carbon taxes and tax breaks. Land use becomes better regulated, especially around riverine corridors. Associated 250m resolution land cover data were developed at UNEP-WCMC.
- **"Sustainability First" scenario of land cover in 2025** – In this scenario based on the GEO Sustainability First Scenario for Latin America, a new environment and development paradigm emerges in response to the challenge of sustainability, supported by new, more equitable values and institutions. A more visionary state of affairs prevails, where radical shifts in the way people interact with one another and with the world around them stimulate and support sustainable policy measures and more accountable corporate behavior. Efficiency in the use of energy, land, and material resources is promoted. There are efforts to adopt an ecosystem approach to land use planning, with particular attention to watershed protection. Associated 250m resolution land cover data were developed at UNEP-WCMC.

---

[5] A quantification of land cover change was developed from preliminary inputs to GEO4 from the International Futures and IMAGE modeling teams, and a set of accompanying narratives were adapted from the Latin America and Caribbean group's input to GEO4. Protected area scenario maps were developed on the basis of international policy targets for the coverage of biomes and endangered species, and implemented differently in each scenario. The CLUE-S model was then used to allocate land cover change. Further information can be found in Luijten, J., Miles, L., Cherrington, E. (2006) *Land use change modelling for three scenarios for the MAR region*. Technical Report to ICRAN MAR project. UNEP-WCMC.

Modeling Erosion and Sediment Delivery

N-SPECT evaluates annual erosion for each grid cell based on the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) developed by the U.S. Dept. of Agriculture[6]. RUSLE combines aspects of slope, rainfall, soil, and land cover to estimate annual soil loss for that location.

Equation 1: RUSLE

Average Annual Soil Loss (tons/acre) = R * K * L * S * C * P

R – Rainfall-runoff erosivity factor
K – Soil erodibility factor
*L*S – Slope steepness and length factors*
C – Cover-management factor
P – Supporting practices factor

The input data sets listed above are elevation, soils, precipitation, and land cover. N-SPECT uses these data sets as the basis for deriving most of the factors that are used in the RUSLE calculation. Some of the derivations are complicated and are described below with additional detail in the technical notes at the back of this report. In summary:

- **LS-factor** – The LS factor adjusts erosion rates based on topography, assigning higher rates to longer or steeper slopes and lower rates to shorter or flatter ones[7]. Slope steepness (S) and slope length (L) are derived from the DEM by N-SPECT. These are combined into one "LS-factor" grid.
- **K-factor** – The SOTERLAC soils database includes the soil-erodibility factor (K-factor) attribute, which represents a soil's susceptibility to erosion by rainstorms. It is an integrated average parameter based on several different erosion and hydrologic processes. A low K-factor (about 0.05 to 0.2) indicates a high resistance to erosion and a high K-factor (about 0.4 or greater) indicates easily eroded soil. N-SPECT develops a GRID based on the K-factor for RUSLE calculations.
- **R-factor** – A grid of the rainfall and runoff erosivity factor (R) for the study area is an input to the N-SPECT model and must be acquired or developed by the user. R-factor represents the average annual erosive effect of storms and is based on an erosivity index (EI) calculated from the kinetic energy of storms and their maximum 30-minute rainfall intensities. These data were not available for the MAR region so an alternate method was used to approximate R-factor. Development of this factor is described in the next section.
- **C-factor –** Each land cover type, such as forest, grassland, or cultivated land has an associated cover-factor or C-factor. This is a relative erosion rate for the given land cover. (See Table 1.) Cultivated land, with a C-factor of .240 is rated as being 60 times as erosive as forest, which has a C-factor of .004. These C-factors

[6] USDA Agriculture Handbook No. 703, found on *Watershed Analysis for the Mesoamerican Reef* data CD, WRI / ICRAN MAR project, 2006.
[7] Ward, Andrew D. and Stanley W. Trimble. Environmental Hydrology, 2nd Ed. CRC Press, LLC. 2004.

for land cover in the MAR region were adapted from C-factors provided by NOAA in N-SPECT. Use of locally derived relative erosion rates would be a valuable refinement of the model.

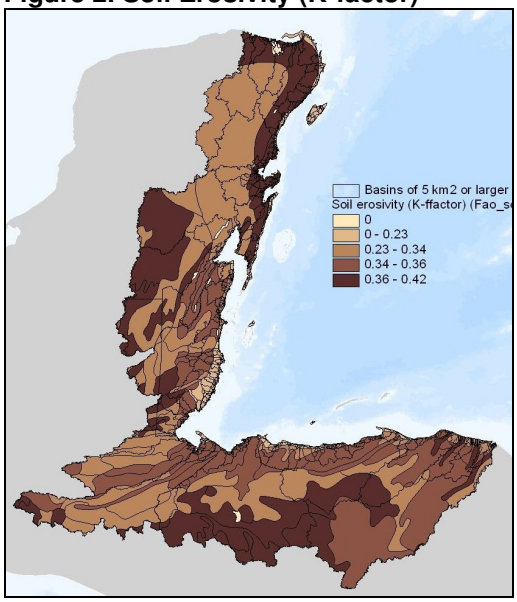
- **P-factor** – RUSLE includes a supporting practices factor or P-factor, which allows inclusion of the influence of conservation practices (such as strip-cropping and terracing) that control and mitigate erosion. The "Supporting Practices" factor module is not available in the current version of N-SPECT. For this reason, we have focused our analysis on the effect of change in land cover on sediment and pollutant delivery to river mouths adjacent to the MAR. In addition, information on specific management practices across the MAR region is fairly limited.

Table 1. N-SPECT C-factor Coefficients

Code	Land Cover Category	Cover-Factor
3	Low Intensity Developed	0.030
4	Cultivated Land	0.240
5	Grassland	0.050
7	Forest	0.004
9	Scrub/Shrub	0.014
10	Palustrine Forested Wetland	0.003
17	Bare Land	0.700
18	Water	0.000

Source: *USDA Agriculture Handbook No. 703*

Figure 2. Soil Erosivity (K-factor)

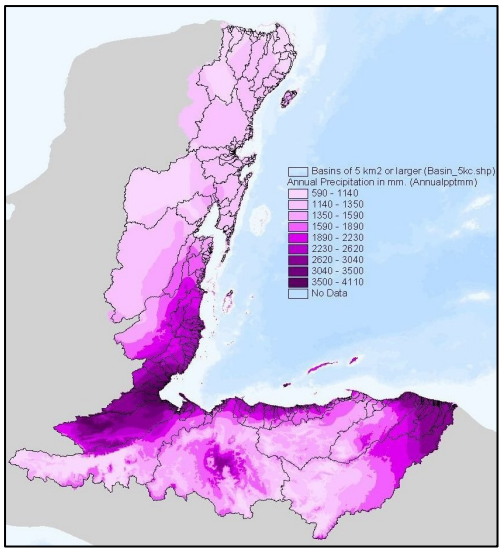


Source: Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean

Precipitation and Rainfall Erosivity

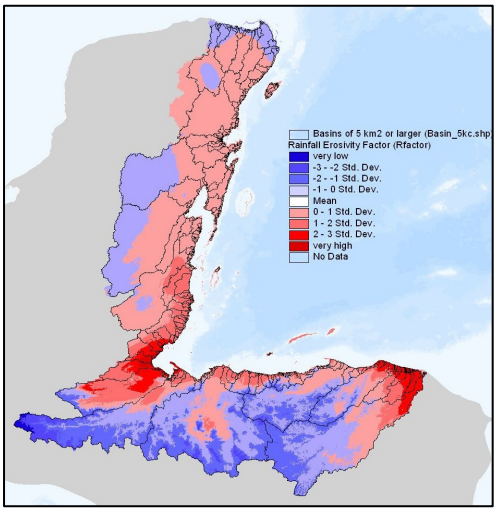
Precipitation Scenario: N-SPECT requires a raster (grid) precipitation data set, specification of the rainfall type in the region (from four synthetic 24-hr rainfall distributions), and the average number of "raining days," which is complicated by the large area and range of precipitation across the region. All annual model runs were conducted using a long-term average yearly rainfall grid (which needs to be specified in inches for N-SPECT), and number of rainy days per year set to 40.[8] This number of rainy days was selected based on calibration of the model to the MAR region by Will Heyman and Shin Kobara at Texas A&M University.[9]

Figure 3. Annual Precipitation Distribution



Source: WorldClim database

Figure 4. Rainfall Erosivity (R-factor)



Source: WRI, 2006

R-Factor: R-factor was empirically derived based on annual precipitation and elevation using an equation for rainfall erosivity in Costa Rica. Project partners at Texas A&M University performed statistical validation of the resulting R-factor for the MAR region and found this equation to be a statistically valid method for use in estimating erosion with the RUSLE for the MAR region.[10] The equation used for R-factor is included in the technical notes at the end of this report.

---

[8] Note: Precipitation must be in inches for N-SPECT. A single number of rainy days must be selected for the entire study area, defined as the "average number of storms in a location in a year." The model was run with "Type II rainfall" selected, as this best represents areas with intense rainfall events.

[9] See document on "Hydrologic Model Calibration" on the *Watershed Analysis for the Mesoamerican Reef* data CD.

[10] Ibid.

Vulnerability of Land to Erosion

The N-SPECT model evaluates erosion and pollutants coming off the land for a given land cover. The project also evaluated the inherent vulnerability of the landscape to erosion based on slope, soil erodibility, and annual precipitation. This simplification of the RUSLE used in N-SPECT excludes land cover. It serves to identify vulnerable areas where conversion to an erosive land cover type should be avoided or, where converted, better management practices should be targeted.

Equation 2: Vulnerability of Land to Erosion -

$$\textbf{Vulnerability} = R * K * S^{0.6}$$

R – Rainfall-runoff erosivity factor
K – Soil erodibility factor
S – Slope (in degrees)

Modeling Runoff and Pollutant Delivery

N-SPECT evaluates runoff based on soil characteristics, land cover, topography, and precipitation. Runoff calculations are based on curve numbers developed by the U.S. Department of Agriculture that reflect the general permeability of a given soil type.[11] Curve numbers are associated with a soil's hydrologic group classification (A, B, C, or D), which is a measure of the drainage potential or infiltration rate of the soil. Soils in Group A are well drained, while soils in Group D drain poorly and tend to be water-logged. Hydrologic group is an attribute contained in the SOTERLAC soils database. Curve numbers also depend on land cover types. N-SPECT selects curve numbers for use in runoff calculations based on the combination of hydrologic soil group and land cover type at each grid cell. These curve numbers are presented in Table 2.

Table 2. N-SPECT Runoff Curve Numbers (Coefficients) by Land Cover Type and Soil Hydrologic Group

Code	Land Cover Category	CN-A	CN-B	CN-C	CN-D
3	Low Intensity Developed	0.61	0.75	0.83	0.87
4	Cultivated Land	0.67	0.78	0.85	0.89
5	Grassland	0.39	0.61	0.74	0.80
7	Forest	0.30	0.55	0.70	0.77
9	Scrub/Shrub	0.30	0.48	0.65	0.73
10	Palustrine Forested Wetland	0.00	0.00	0.00	0.00
17	Bare Land	0.77	0.86	0.91	0.94
18	Water	0.00	0.00	0.00	0.00

Source: *Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55, USDA-NRCS*

[11] Refer to *Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55, USDA-Natural Resource Conservation Service (NRCS)* on *Watershed Analysis for the Mesoamerican Reef* data CD.

N-SPECT evaluates pollutant loads based on runoff, land cover, and topography. Coefficients representing the contribution of each land cover class to runoff of pollutants (nitrogen, phosphorous, and total suspended solids) are applied to land cover data sets to approximate pollutant loads. These coefficients reflect the expected pollutant mean concentration from each land cover type and were derived from published studies and research by NOAA and are provided with the N-SPECT model. Modeling can be made more accurate through the use of locally derived pollutant coefficients, but such data were not available for the MAR region. The coefficient derivation process is described in the *N-SPECT Technical Guide* on the *Watershed Analysis for the Mesoamerican Reef* data CD.

Table 3. Pollutant Coefficients for Phosphorous, Nitrogen, and Total Suspended Solids (TSS)

Class		Coefficients		
Value	**Name**	**Phosphorous**	**Nitrogen**	**TSS**
3	Low Intensity Developed	0.18	1.77	19.1
4	Cultivated Land	0.42	2.68	55.3
5	Grassland	0.48	2.48	55.3
7	Evergreen Forest	0.05	1.25	11.1
9	Scrub/Shrub	0.05	1.25	11.1
10	Palustrine Forested Wetland	0.20	1.10	19.0
17	Bare Land	0.12	0.97	70.0
18	Water	0.00	0.00	0.0

Source: *Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55, USDA-NRCS*

Circulation Modeling

The University of Miami adapted a circulation model to examine the transport of buoyant matter along the MAR. (Buoyant matter includes suspended sediments, organic detritus, and dissolved nutrients.) The Regional Ocean Modeling System (ROMS) provides spatial and temporal modeling of ocean circulation and transport by currents of river discharge along the MAR. The model includes the barrier reef, reef lagoon, and adjacent oceanic waters, as well as bottom topography (bathymetry) at 1km resolution. The horizontal resolution of the simulation is 2km (grid cell size).[12] Both the state of the ocean (temperature, salinity, currents, and tides) and the surface fluxes (wind, rain, solar, and radiative heat fluxes) are accounted for in the model simulation of oceanic and coastal waters. They were taken from the Levitus ocean and atmospheric climatology,[13] which provides long-term monthly averages for a year. Monthly river discharge and sediment delivery (used as a proxy for buoyant matter load) were provided from the N-SPECT

[12] The vertical resolution of the ROMS model varies with distance from shore.
[13] For more information on Levitus climatology see http://ingrid.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.LEVITUS94/ (ocean climatology) and http://icoads.noaa.gov/status.html (atmospheric climatology).

model.[14] Within the ROMS model, rivers are defined as point sources. The tracking of buoyant matter dispersal is computed in ROMS through hydrodynamic passive transport.[15]

From these methods, the model produces a climatology (reflecting long-term average conditions) of the circulation and buoyant matter transport in the MAR region. Four numerical simulations were done to understand the response of the ocean to the river runoff and sediment delivery associated with different land cover scenarios and storm events. The model was initiated with data reflecting "current" conditions (land cover for 2003/4 and mean monthly precipitation). The model was run for two model years to get to a valid equilibrium representation of accumulated river discharge and sediment delivery. The model reached its buoyant matter equilibrium in winter of the second year. All simulations for comparison were started at the end of that second year. Simulations were run to capture river discharge and sediment delivery associated with (a) the "current land cover" scenario, (b) the "sustainability first" scenario, (c) the Hurricane Keith storm event, and (d) the Hurricane Mitch storm event.

Model Calibration and Validation

Complex, multi-stage modeling should be validated at every possible stage of the analysis. This analysis serves to integrate a wide range of data, and adapt modeling tools for an innovative, region wide analysis. Where possible, data from published sources or proxy indicators derived from remote sensing were used to calibrate and validate model results, and these are described below. An important aspect of the project, however, is to provide these modeling tools to partners in the MAR region, so that they might apply them at higher resolution and then use local data to initially calibrate, and later validate model results. The region-wide results presented in this paper should be considered preliminary and indicative of overall patterns of erosion and nutrient and sediment delivery across the region.

1. **Evaluation of input data sets.** The best available region-wide data sets were used in this analysis. All input data sets (elevation, rivers, precipitation, soils, and land cover) were evaluated for spatial accuracy and attribute consistency. No

[14] Monthly estimates of sediment delivery (total erosion within the watershed) are provided as input to the ROMS model. These estimates overstate sediment delivery, but are indicative of relative distribution, seasonal patterns and the overall magnitude of sediment delivery. Within the ROMS model, the sediment was used as a proxy for buoyant matter, which includes suspended sediments, organic detritus, and dissolved nutrients.

[15] The "hydrodynamic passive tracer transport" of the ROMS model uses an "advection-diffusion" scheme which captures both transport by current (advection) and dispersion by turbulence (diffusion.) Using outputs of the ROMS model, the sources of the buoyant matter (river mouths) and destination (reef locations) are linked through a connectivity matrix.

input data was identified as having limitations that would significantly affect model results.[16]

2. **Calibration of runoff and rainfall parameters.** Runoff and erosion estimates are very dependent on two input parameters - the rainfall erosivity factor (R-factor) and number of rainy days per year. Project collaborators at Texas A&M University tested model input parameters (both R-factor and number of rain days) to calibrate the runoff and sediment delivery components of the model. The selected parameters achieved good correlations with discharge predictions from a water balance model, and erosivity estimates.[17] This calibration is described in detail in "Hydrologic Model Calibration" on the *Watershed Analysis for the Mesoamerican Reef* data CD.

3. **Validation of river discharge.** River discharge values from N-SPECT were compared with values calculated using a water balance model[18] which has compared well with actual runoff data in six watersheds in the Gulf of Honduras. Discharge estimates had comparable patterns and were generally within 25 percent of the published estimates.

4. **Local rates of erosion and pollutant runoff.** Within N-SPECT, erosion source estimates rely on application of the RUSLE, while pollutant runoff estimates rely on application of runoff curve numbers developed by USDA. Both of these estimation techniques are widely used. These equations could be made more accurate in the future through the use of locally derived erosion and pollutant coefficients, but such data were not available for the MAR region. Although only limited local data were available for validation of these estimates, the overall estimates of local erosion, N and P runoff (sources) were found to be within reasonable bounds compared to estimates from other areas.[19]

5. **Sediment and pollutant delivery to river mouths**. Few data from the MAR region are available for validation of model outputs. Sediment delivery results have been compared with survey data from the Watershed Reef Interconnectivity Scientific Study (WRIScS)[20] and modeled estimates from Thattai et al.[21] In

---

[16] SRTM data, radar-derived elevation data, have inherent inaccuracies due to detection of natural and manmade features such as trees and buildings. These errors will effect some slope calculations, but will not effect overall model results significantly.

[17] Water balance equation from Thattai, Deeptha, Björn Kjerfve, W.D. Heyman, 2003. Hydrometeorology and variability of water discharge and sediment load in the Inner Gulf of Honduras, Western Caribbean. *Journal of Hydrometeorology* 4: 985-995. Erosivity estimates from Mikhailova, E.A., R.B. Bryant, S.J. Schwager, and S.D. Smith. 1997. Predicting rainfall erosivity in Honduras. *Soil Science Society of America Journal.* 273-279.

[18] Thattai, Deeptha, Björn Kjerfve, W.D. Heyman, 2003. Hydrometeorology and variability of water discharge and sediment load in the Inner Gulf of Honduras, Western Caribbean. *Journal of Hydrometeorology* 4: 985-995.

[19] Ranges of reasonable values (low, typical, and high) were established for erosion (by applying the RUSLE), for nitrogen runoff (by applying a nitrogen balance equation) and for phosphorous runoff (by coupling RUSLE results with estimates of phosphorous concentration in the soil).

[20] Nunny, Rob, M. Santana, P. Stone, D. Tillet, and Prof. D. Walling, 2001. An Investigation of the Impact on Reef Environments of Changing Land Use in the Stann Creek District in Belize. Technical Report Module 3. The Watershed Reef Interconnectivity Study (WRIScS) 1997-2000.

addition, sediment delivery and sediment yield (per unit area) were compared with estimates for similar size and gradient watersheds from around the world.[22] Estimates of sediment delivery from N-SPECT were found to be higher than expected in the largest watersheds in the region. A key limitation of the N-SPECT model is that it does not adequately account for sediment and nutrient attenuation (loss or redeposition) within the watershed en route to the river mouth.[23] Overestimation is likely to be greater for sediments than nutrients, as large sediments are more affected by redeposition than nitrogen (in solution) or phosphorous (attached to smaller soil particles.) N-SPECT results, therefore, indicate a high end, or "worst case scenario" of nutrient and sediment delivery. Overall yields (per unit area) of N and P seem reasonable, given the expected ranges of N and P in runoff, described above. The estimates of sediment yield and sediment delivery by basin seem high, particularly for the largest watersheds. In the largest watersheds, sediment delivery might be overestimated by a factor of two to four. Estimates of sediment and nutrient delivery at river mouths, therefore, indicate the relative patterns and order of magnitude, but should not be regarded as accurate absolute values.

6. **Sediment Transport to Reef.** Modeling of the extent of buoyant matter reaching the MAR estimated in the ROMS model is being compared to Colored Detrital Matter[24] (CDM) maps derived from Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) satellite imagery. The Spectral Optimization Algorithm (SOA)[25] was used to process SeaWiFS data in the optically complex[26] waters of the Caribbean Sea along the MAR. The output product, $a_{\mathrm{CDM}}(443)$ (called CDM) is an absorption coefficient which is a good proxy for the buoyant matter transport. Figure 5 reflects the lag between mean monthly river discharge and mean CDM in processed SeaWiFS images.

---

[21] Thattai, Deeptha, Björn Kjerfve, W.D. Heyman, 2003. Hydrometeorology and variability of water discharge and sediment load in the Inner Gulf of Honduras, Western Caribbean. *Journal of Hydrometeorology* 4: 985-995.

[22] John D. Milliman and James P. M. Stvitski, 1992. Geomorphic / Tectonic Control of Sediment Discharge to the Ocean: The Importance of Small Mountainous Rivers. In *The Journal of Geology*, 1992, volume 100, p. 525-544.

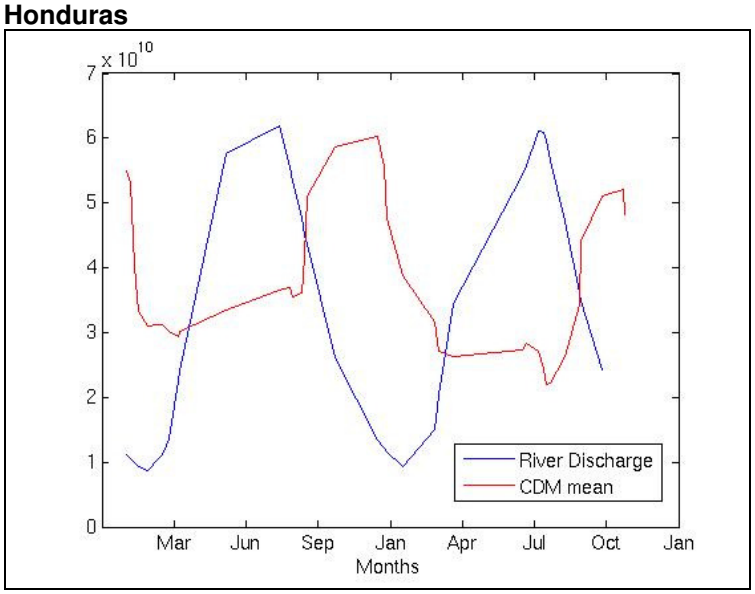
[23] N-SPECT applies a sediment delivery ratio (SDR) within each individual grid cell to adjust sediment load, but not across the basin to account for redeposition en route to the river mouth.

[24] CDM includes dissolved organic carbon from soil and plants, often referred to as Colored Dissolved Organic Matter (CDOM), plus detrital particles (dead organic matter).

[25] Kuchinke, C.P., H.R. Gordon, L.W. Harding, Jr., and K.J Voss, A coupled oceanic and atmospheric spectral optimization algorithm for ocean color imagery in Case 2 waters: a validation for Chesapeake Bay, SUBMITTED FOR PUBLICATION, *Remote sensing of Environment* (2006).

[26] Optically complex waters include multiple constituents such as colored dissolved organic matter as well as phytoplankton.

Figure 5. Temporal Relationship Between N-SPECT River Discharge Estimates and the Mean Colored Detrital Matter (CDM) Absorption Coefficient from Imagery for the North of Honduras



Source: University of Miami, 2006.

CDM classifications from SeaWiFS images are used to evaluate two aspects of the ROMS circulation model results – (1) the seasonal variation of the buoyant matter plume dispersion patterns, and (2) the seasonal variation of the total buoyant matter concentration. Buoyant matter plumes from the ROMS circulation simulation were compared to the CDM classifications along transects perpendicular to the coast.

Seasonal patterns are similar between the estimated buoyant matter plumes from the ROMS simulations and the seasonal trends observed in the SeaWiFS data, though there is considerable year-to-year variation in the latter. Overall, the model agrees very well with the observations both in time and location. Some discrepancies exist, however, in the structure of the gradient of the plume. If we compare the position of the edge of the average CDM plume from SeaWiFS and the modeled buoyant matter plumes, the CDM plumes varies seasonally between 10 and 40km while in the ROMS model the plume is almost always 40km wide. Such a difference could be due to a diffusion coefficient used in the ROMS model, which is too small. Validation of the circulation model is described in greater detail in "Dynamics of Buoyant Matter in the MAR Region" on the *Watershed Analysis for the Mesoamerican Reef* data CD.

Limitations of the Analysis

Any multi-stage modeling process will have inevitable inaccuracies, so it is vital to be aware of model limitations and only use results appropriately.

Limitations of Hydrologic Modeling

A key limitation of the N-SPECT model is that the model does not adequately account for sediment and nutrient attenuation (loss or redeposition) within the watershed en route to the river mouth. As a result, estimates of sediment and nutrient delivery at river mouths are exaggerated. The absolute numbers are not accurate, but are indicative of the overall magnitude and patterns of sediment and nutrient delivery across the region. These estimates are still useful for examining relative patterns and the implications of different policy scenarios, because the estimates of percentage change are valid.

A second limitation of the modeling is the focus on the role of land cover change without considering the effect of specific land management practices. This emphasis arises from two issues. For the MAR region, information was only available on land cover type and not on the location of specific management interventions. In addition, detailed information on reductions in erosion and nutrient runoff associated with each of the agricultural management practices is not currently available. Once this information is developed, however, it should be possible to evaluate benefits in N-SPECT by treating each management intervention on each land cover type as a new, unique land cover category with a specific land cover factor (C-factor) and pollutant coefficients for the given category (i.e. citrus crops with erosion control). This would be a valuable extension to the current analysis.

Another limitation of the model is that dams, which serve to trap sediment, have not been included in the model. It should be technically possible to develop a function to include dams, provided that information on sediment retention rates by dams is available. This feature could be considered in local applications of the N-SPECT model.

Limitations of Circulation Modeling

Regarding the circulation modeling of the MAR, the first limitation is that the result is a climatology. Namely, the circulation is representative of the most common conditions that one would encounter each year if every extreme or unusual weather or ocean state event were removed. It reflects long-term average conditions. Therefore, day-to-day comparison between the model circulation and current observations is irrelevant. But if compared with observations during the same month over several years, then common patterns can be found and compared to the model results.

The second limitation is the sparseness of the CDM interpretations because of cloud cover in the SeaWiFS images they were derived from. For example, there are few clear SeaWiFS images of the MAR region during the summer months. However, there are enough observations to recover the global trend of the CDM concentration over a year as shown in Figure 5.

The third limitation is that there is no direct relationship between the CDM absorption coefficient and the CDM concentration. Direct measurements from water samples, which are not available yet, are necessary to get such information. Therefore, only the circulation model can be used to estimate the buoyant matter load to the reefs.

Finally, in the numerical model, buoyant matter will not accumulate or deposit, but will be constantly transported until flushed out of the domain. However, it is possible to estimate how much buoyant matter would accumulate by counting how much passes by

any location. The model and the observations reflect the maximum extent of the plume and its behavior over time.

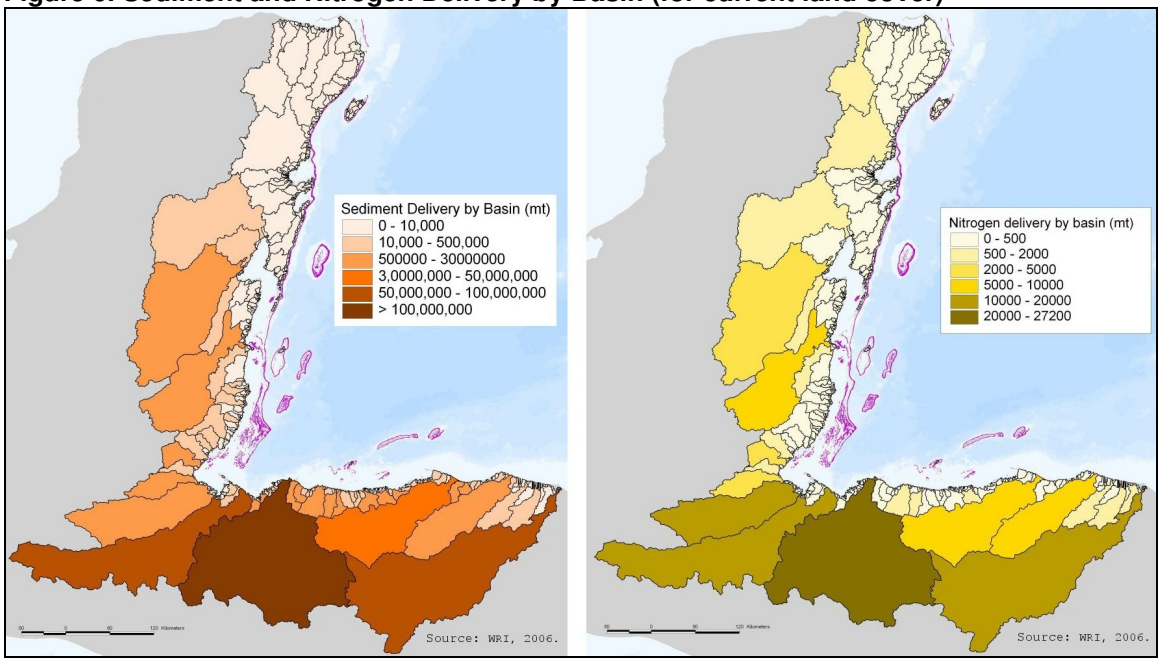
Analysis Results

The presentation of results first focuses on basin-level delivery of sediment and pollution to more than 400 river mouths along the MAR. We initially examine sediment and pollutant delivery given current land cover (2003/04) and subsequently compare these to results which use other land cover scenarios ("natural" land cover and three scenarios of land cover in 2025). Next, we examine sediment transport in coastal waters along the reef. Finally, we present an analysis of the vulnerability of the land to erosion and an evaluation of the local origin of sediment and pollution.

1. Sediment and Pollutant Delivery given Current Land Cover (2003/04)

N-SPECT was used to evaluate accumulation of sediment, nitrogen (N), phosphorous (P), and total suspended solids (TSS) in more than 400 watersheds across the MAR region. The maps in Figure 6 reflect the relative accumulation of sediment and N at river mouths across the region. The Ulua watershed in Honduras was found to be the largest contributor of sediment, N, P and TSS. Other rivers identified as large contributors of sediment and nutrients are the Patuca (in Honduras), Motagua (in Guatemala and Honduras), Aguan (in Honduras), Dulce (in Guatemala), Belize River (in Belize), and Tinto o Negro (in Honduras). (Watershed names are provided on the map in Figure A in the Key Findings.)

Figure 6. Sediment and Nitrogen Delivery by Basin (for current land cover)



2. Comparison of Results for Current Land Cover (2003/04) to Hypothetical Natural Land Cover

To evaluate the impact of human alteration of the landscape on sediment and pollutant delivery to river mouths along the MAR, the N-SPECT model was run on both current (2003/04) land cover and on hypothetical natural (unaltered) land cover. Table 4 provides a comparison of the land cover distribution for these two time periods. River discharge, sediment delivery, and pollutant delivery (nitrogen, phosphorous, and total suspended solids) to over 400 river mouths is summarized in Table 5. Human alteration of the landscape has nearly doubled runoff and associated discharge at the river mouths. The N-SPECT model suggests that sediment delivery has increased by a factor of 20, while nitrogen has increased by a factor of 3, phosphorous by a factor of 7, and TSS by a factor of 5.

Table 4. Comparison of Natural and Current Land Cover (percent in each cover type)

Land Category	Natural	Current
Developed / Urban	0.0%	0.3%
Cultivated	0.0%	32.4%
Savanna / Grassland	1.8%	1.6%
Forest	82.4%	50.6%
Scrub / Shrub	8.3%	10.4%
Wetland / Mangrove	6.0%	3.2%
Bare / beach / unknown	0.4%	0.3%
Water	1.1%	1.2%

Source: ICRAN MAR, 2006

Table 5. Comparison of Regional Results for Annual Model Runs for Current and Natural Land Cover

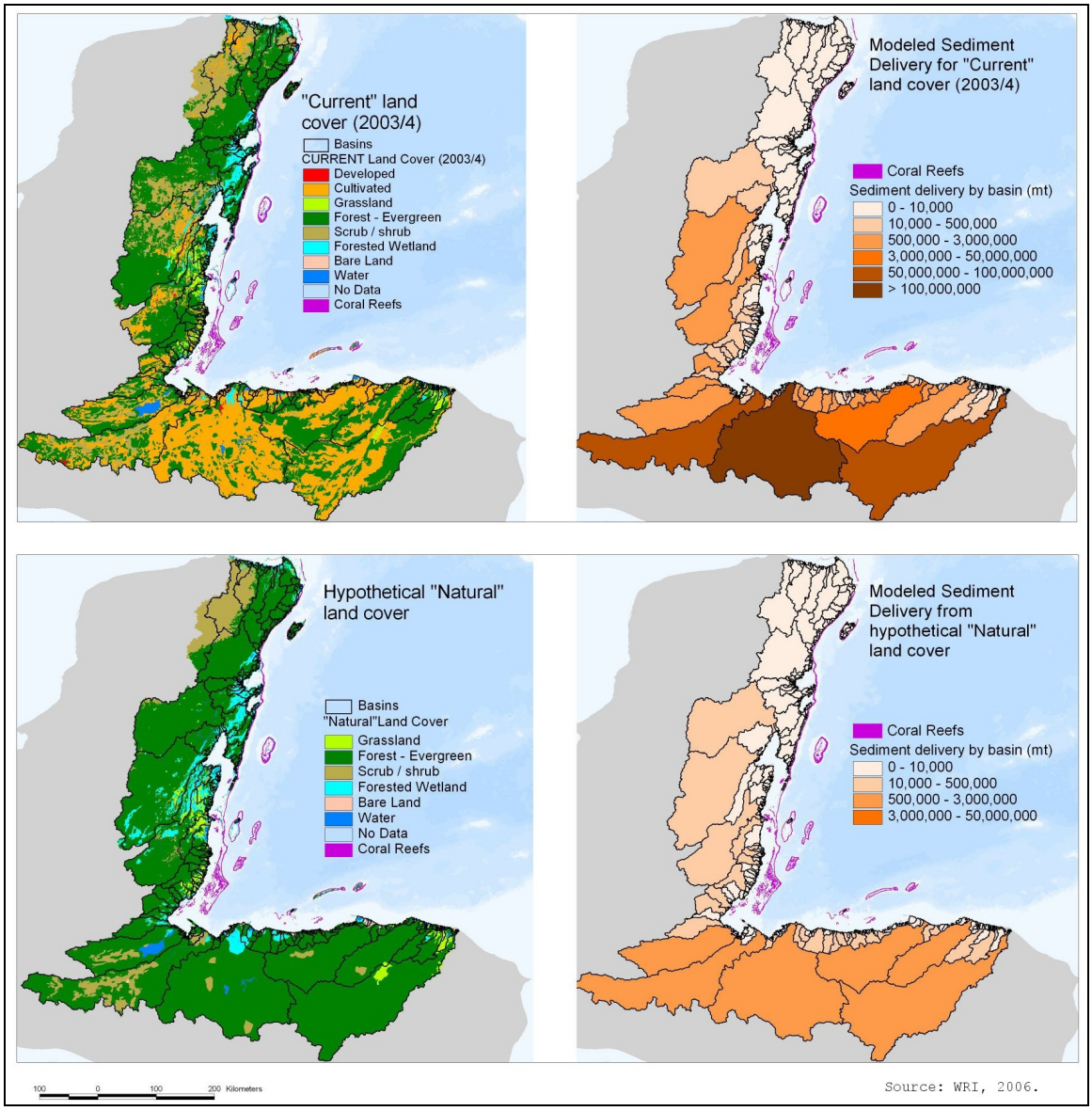
Scenario	Discharge ($x\ 10^9\ m^3$)	Sediment ($x\ 10^9$ mt)	Nitrogen ($x\ 10^3$ mt)	Phosphorous ($x\ 10^3$ mt)	TSS ($x\ 10^3$ mt)
Current (2003/2004)	60	370	130	17	2,400
Natural (no development)	34	17	45	2	470
Ratio of Current / Natural	2 X	22 X	3 X	7 X	5 X

Note: Sediment, N, P and TSS delivery represent upper bound estimates for the region, as loss of sediment or nutrients due to redeposition or other processes is not accounted for. The values reflect overall erosion and pollutant runoff within the region, and are indicative of the overall magnitude of sediment and nutrient delivery, but should not be regarded as absolute values. The relative relationship between the scenarios is valid.

Source: WRI, 2006

Figure 7 presents both land cover and sediment delivery results for current land cover and hypothetical natural land cover.

Figure 7. Modeled Sediment Delivery from "Current" and Hypothetical "Natural" Land Cover



3. Comparison of Current Land Cover to Three Development Scenarios in 2025

Scenarios of land cover change in the MAR region though 2025 are used to evaluate the impact of land cover change on river discharge, sediment, and pollutant delivery. Table 6 and Figure 8 reflect the distribution of land cover in these scenarios. The N-SPECT model was run on these three land cover scenarios and results are summarized in Table 7. The N-SPECT model suggests that the Markets First scenario would result in a 13% increase in sediment delivery relative to that of current land cover, while sediment would only increase by 5% under the Policy First Scenario and would decrease by 5% under the Sustainability First Scenario. Nutrient and TSS delivery would also increase significantly

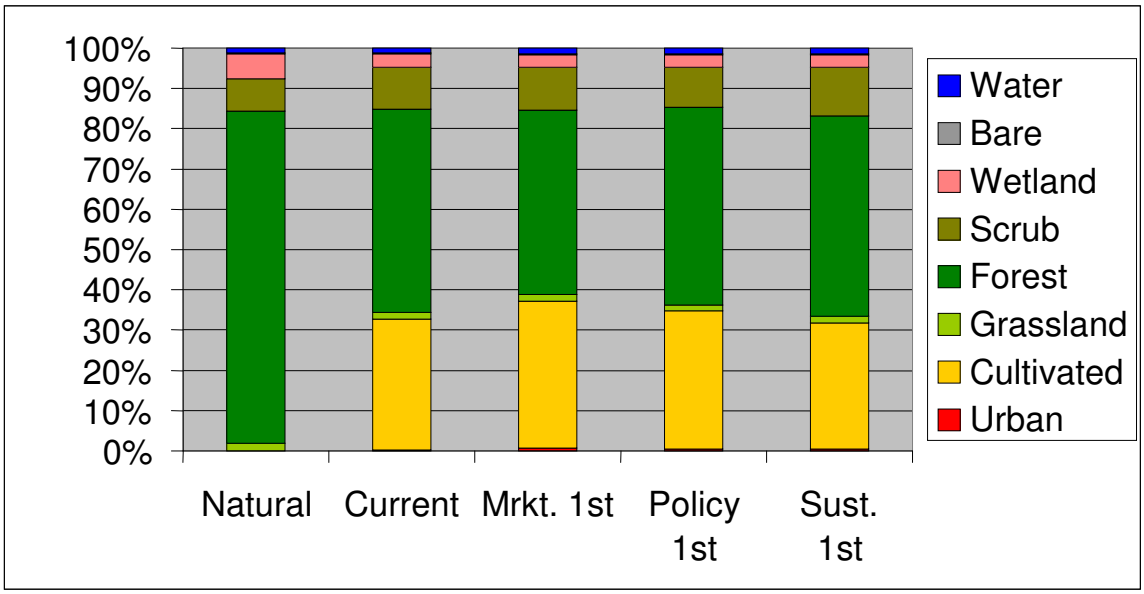
from current land use under the Market First Scenario (8 – 11% increases in nitrogen, phosphorous, and TSS delivery are projected). At the other extreme is the Sustainability First Scenario which could result in a 4 - 5% percent decline in nutrients and TSS, based solely on changes in land cover. Additional reductions in sediment and nutrient delivery can be achieved through the implementation of better agricultural management practices, which were not considered in these scenarios.

Table 6. Comparison of Land Cover Scenarios (percent in each cover type)

Land Category	Current	Markets First	Policy First	Sustainability First
Developed / Urban	0.3%	0.6%	0.6%	0.5%
Cultivated (Ag)	32.4%	36.7%	34.2%	31.3%
Savanna / Grassland	1.6%	1.5%	1.5%	1.7%
Forest	50.6%	45.8%	48.9%	49.8%
Scrub / Shrub	10.4%	10.6%	9.9%	11.9%
Wetland / Mangrove	3.2%	3.1%	3.2%	3.1%
Bare / beach / unknown	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%
Water	1.2%	1.4%	1.4%	1.4%

Source: ICRAN MAR, 2006

Figure 8. Land Cover Distribution Within Each Scenario



Source: ICRAN MAR, 2006

Table 7. Comparison of Regional Results for Annual Model Runs for Current Land Cover and Three Scenarios in 2025

Scenario	Discharge (x 10^9 m^3)	Sediment (x 10^9 mt)	Nitrogen (x 10^3 mt)	Phosphorous (x 10^3 mt)	TSS (x 10^3 mt)
Current (2003/2004)	60	370	130	17	2,400
Markets First	63	420	140	19	2,630
Change from Current	5%	13%	8%	11%	10%
Policy First	61	390	135	18	2,480
Change from Current	2%	5%	3%	5%	4%
Sustainability First	59	355	125	16	2,300
Change from Current	-2%	-5%	-4%	-5%	-4%

Note: Sediment, N, P, and TSS delivery represent upper bound estimates for the region, as loss of sediment or nutrients due to redeposition or other processes is not accounted for. The values reflect overall erosion and pollutant runoff within the region, and are indicative of the overall magnitude of sediment and nutrient delivery, but should not be regarded as absolute values. The relative relationship between the scenarios is valid.

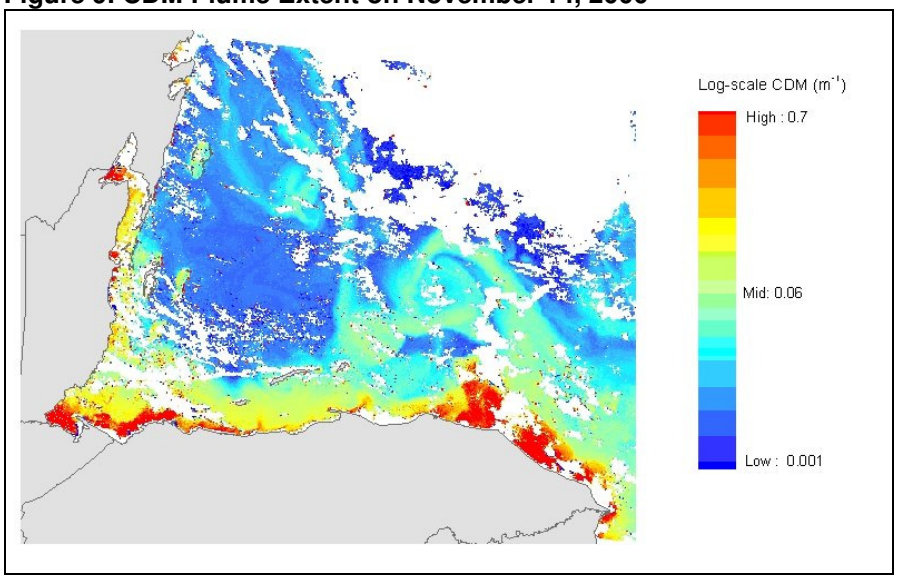
Source: WRI, 2006

4. Extreme Events

Using the N-SPECT model, WRI has modeled runoff, erosion, and sediment delivery in the MAR region during extreme rainfall events, such as hurricanes. An analysis of the Hurricane Keith storm event in Belize was implemented for an area that covered 90 watersheds in Belize.[27] During the five-day storm event (Sept. 29 – Oct. 3, 2000), discharge from these 90 watersheds was estimated at approximately 30% of the normal (modeled) annual total discharge, while sediment delivery was approximately 50% of the normal annual. Impact of rainfall during Hurricane Mitch (Oct. 27-30, 1998) was evaluated for over 100 watersheds in Honduras.[28] Discharge was estimated at approximately one-third of the normal (modeled) annual total and estimated sediment delivery was over two-thirds of that predicted for an average year. This analysis highlights the significant impact large storm events have on sediment delivery in the coastal zone. Figure 9 shows the extent of the CDM plume on November 14th, 2000, approximately two weeks after Hurricane Mitch.

[27] Precipitation data for Hurricane Keith was provided by the Belize Meteorological Department.
[28] Precipitation data for Hurricane Mitch comes from the US Geological Survey (USGS).

Figure 9. CDM Plume Extent on November 14, 2000



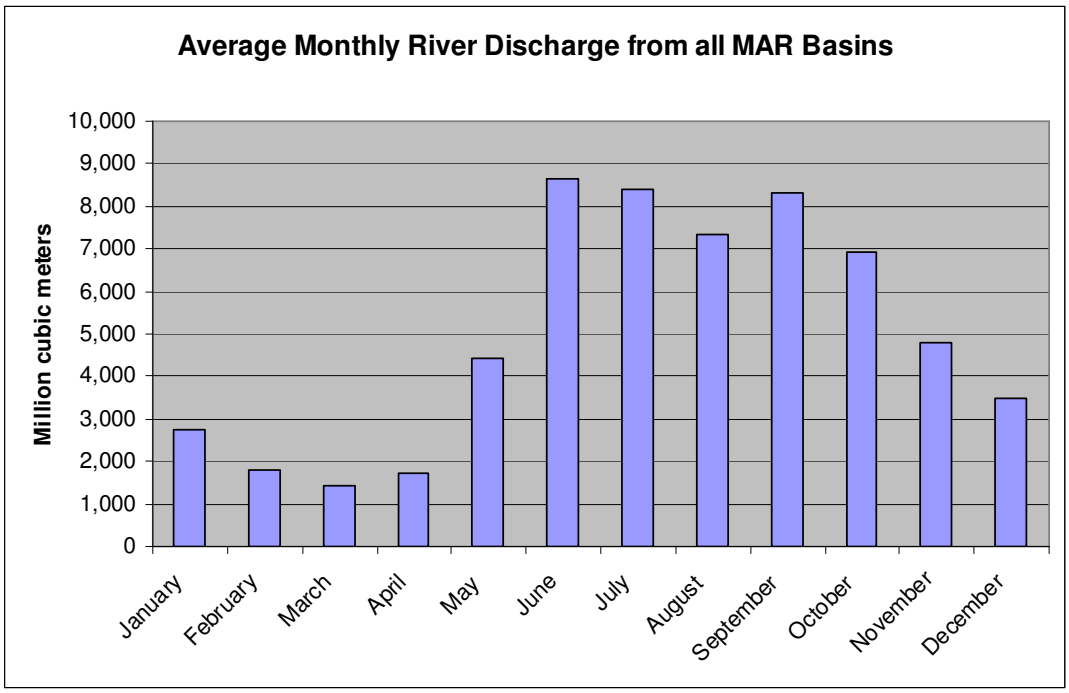
Source: Colored detrital matter (CDM) plume extent interpreted from SeaWiFS imagery by Christopher Kuchinke, University of Miami. Note: the Spectral Optimization Algorithm (SOA) replaces the entire 'standard' SeaWiFS atmospheric correction and bio-optical algorithm.

5. Buoyant Matter Transport along the MAR

WRI applied the N-SPECT model on a monthly basis to develop estimates of average monthly river discharge and sediment delivery for both the "current" land cover and "sustainability first" land cover scenarios. These were used as input to the ROMS ocean circulation model run at the University of Miami to predict buoyant matter transport along the MAR. The ROMS model results reflect seasonal variation of buoyant matter plume extent and concentration. Full year animations of buoyant matter circulation for both scenarios are available on the *Watershed Analysis for the Mesoamerican Reef* data CD. A more detailed description of the ROMS circulation model application and results, as well as observations of circulation patterns from SeaWiFS is included in "Dynamics of Buoyant Matter in the MAR Region" on the same data CD[29]. Figure 10 reflects the seasonality of river discharge estimated by the N-SPECT model.

[29] Cherubin, L.M., C. Kuchinke, C.B. Paris, and J.Kool, 2006. Dynamics of Buoyant Matter in the Meso-American Region reefs from SeaWiFS data and from a high resolution numerical simulation. University of Miami. Final report to World Resources Institute.

Figure 10. Estimated Monthly River Discharge from N-SPECT



Source: WRI, 2006

Results from the two scenarios can be compared to explore the potential impact of changes in land use on the modeled buoyant matter delivery to the MAR. The plume extents and concentration from the two scenarios can be compared on a month-by-month basis, or annual summary statistics can be developed to reflect the mean annual buoyant matter concentration at each reef location, the maximum annual concentration, or the number of months where the concentration exceeds some threshold.

Figure 11 reflects the simulated buoyant matter plume for December for both current land cover and the Sustainability First scenario. The ROMS model predicts a less extensive and less concentrated buoyant matter plume off of the coast of Honduras during December, but predicts increased concentrations in two semi-enclosed bays of the Yucatan – Baha de la Ascension and Bahia del Espiritu Santo. Much of this change is due to decreased sediment delivery in the Sustainability First scenario. The increase in buoyant matter along the Yucatan, however, results from a change in the circulation predicted by ROMS along the MAR. Much like variability in weather, there is variability in ocean circulation. During winter in the Sustainability First scenario, the usual anticlockwise rotating gyre north of Honduras is replaced by the Caribbean current. The current flows straight from the eastern tip of Honduras to the coast of the Yucatan carrying sediments from Honduras.

Figure 11. Simulated Buoyant Matter Concentration Along the MAR for December (Current Land Cover and Sustainability First Scenarios)

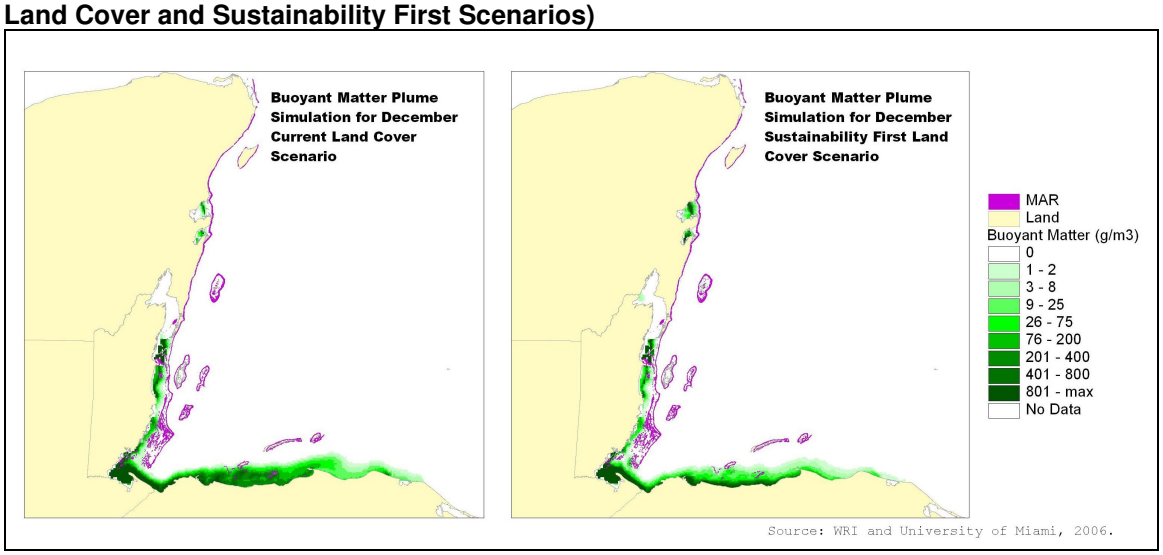


Figure 12 reflects the maximum buoyant matter plume extent and concentration for the year for the same two land cover scenarios. ROMS simulations suggest that under the Sustainability First scenario the buoyant matter plume extent and concentration will be reduced along the coast of Honduras, and less buoyant matter will reach the barrier reef in southern Belize. The simulations again predict increased concentrations in the semi-enclosed bays of the Yucatan. These reductions in buoyant matter plume extent could result from changes in sediment delivery resulting from land cover change (reductions in cultivated land) as well as due to variability in the ROMS simulations.

Figure 12. Maximum Annual Simulated Buoyant Matter Concentration Along the MAR (Current Land Cover and Sustainability First Scenarios)

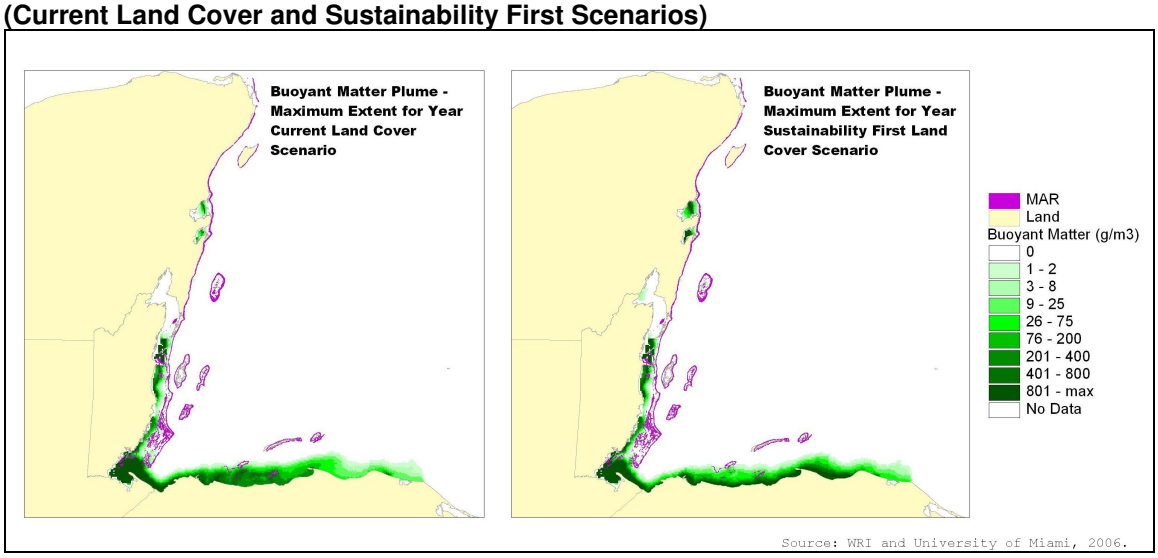
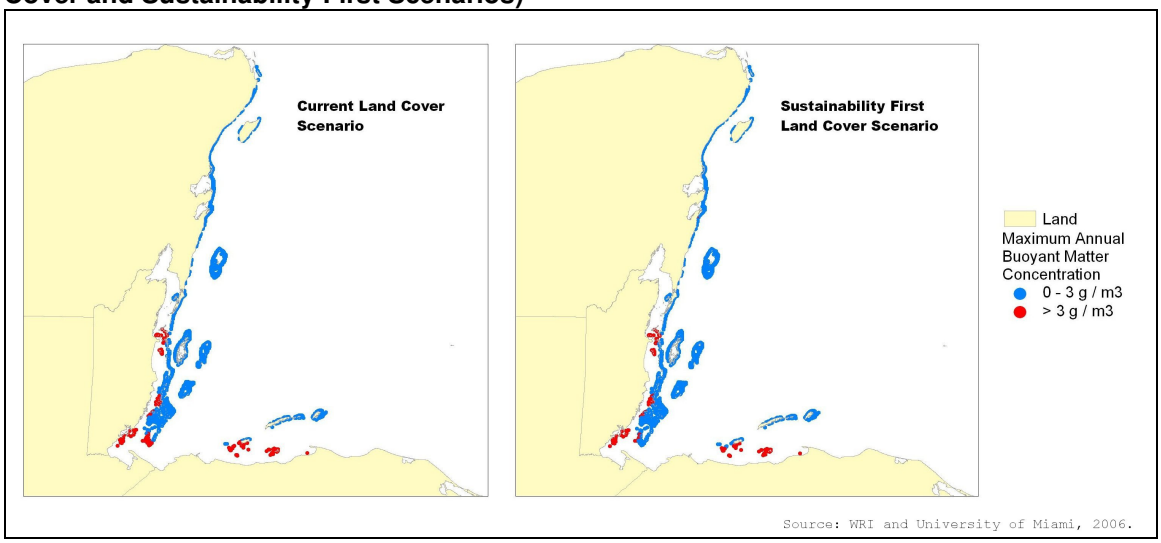


Figure 13 depicts coral reefs of the MAR, mapped whether or not the buoyant matter concentration exceeds 3 grams per cubic meter (g / m^3) during any month of the year. Under the ROMS simulation for current land cover, 12% of the coral reefs of the MAR exceed this threshold, while under the Sustainability First scenario, this proportion drops to 10%. This improvement points to the significant effect that improved land management can have on sediment and pollutant delivery to the MAR.

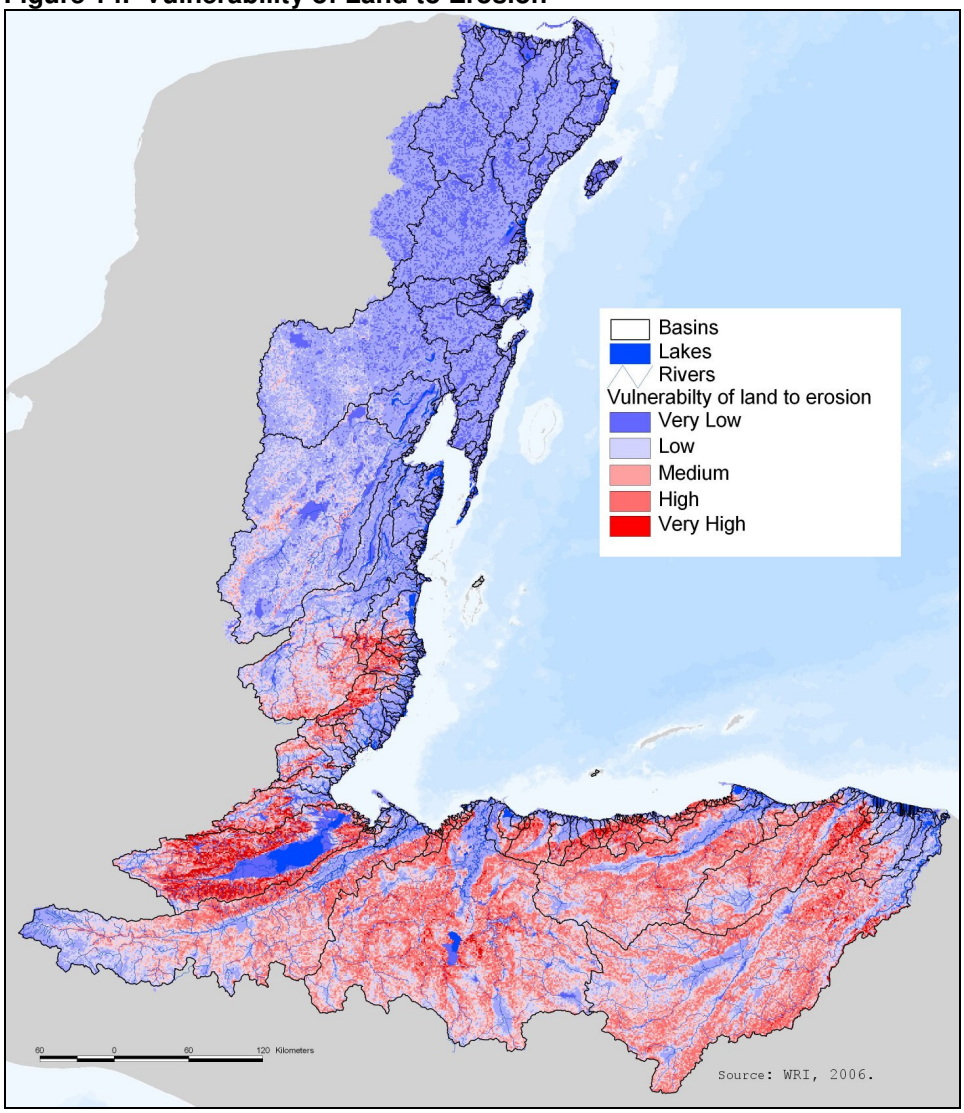
Figure 13. Mesoamerican Reef Mapped by Buoyant Matter Concentration (Current Land Cover and Sustainability First Scenarios)



6. Vulnerability of the Land to Erosion

Development of land management priorities requires detailed local-level information on sources of sediment, and the vulnerability of areas to erosion. WRI has developed a landscape-wide indicator of the vulnerability of land to soil erosion. It incorporates the slope of the land, soil erodibility, and annual precipitation into a 1 km resolution indicator of the relative vulnerability of the land to erosion. This indicator does not consider the current land cover or land use. Rather, it provides an overall indicator of erosion-prone areas, and therefore, a guide to areas where restrictions on development, or the implementation of best agricultural management practices should be encouraged. Vulnerability is high in many areas in Guatemala and Honduras as well as some mountainous areas in Belize. (See Figure 14.)

Figure 14. Vulnerability of Land to Erosion

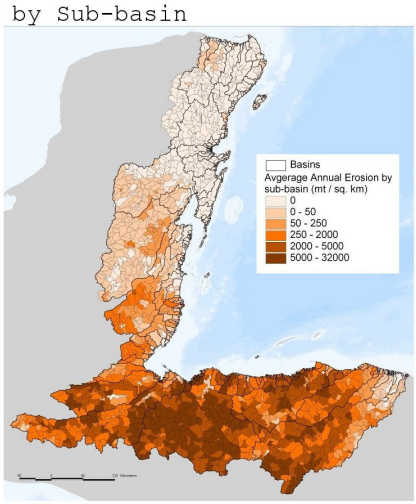


7. Local Sources of Sediment and Nutrients

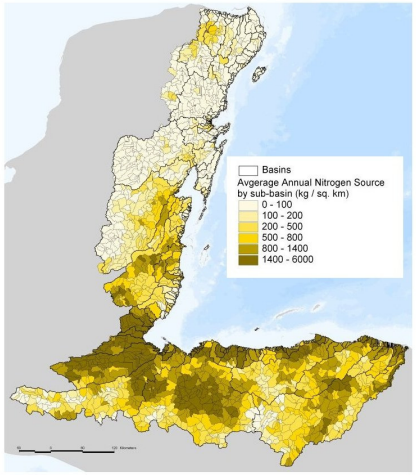
N-SPECT was run in "local effects" mode to evaluate the amount of eroded sediment and nutrients originating from within each 250m resolution grid cell, independent of contributions from adjacent or upstream grid cells. The evaluation was done using current land cover (2003/04). These results were summarized by sub-basin, as an aid to priority-setting and the targeting of better management practices. The following maps reflect the average erosion, Nitrogen runoff, and Phosphorous runoff per grid cell within each sub-basin. Overall watershed boundaries are also shown both for reference and to allow a linking of sources within the sub-basins with the previous maps of sediment and nutrient delivery by basin.

Figure 15. Average Contribution of Sediment, Nitrogen, and Phosphorous by Sub-basin

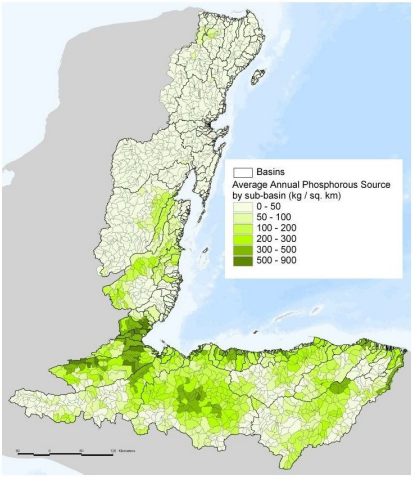
Average Annual Soil Erosion by Sub-basin



Average Annual Nitrogen Source by Sub-basin



Average Annual Phosphorous Source by Sub-basin



Source: WRI, 2006.

Local sources of sediment, N, and P were also summarized by country. Most of the sediment and nutrients delivered by watersheds along the MAR originate in Honduras. The model suggests that over 80% of sediment originates in Honduras, while 17% of sediment originates in Guatemala. Relatively minor percentages come from Belize and Mexico. Honduras is also the largest source of nutrients (55% of N and 60% of P), while Guatemala contributes about one-quarter of all N and P in these watersheds. Belize contributes about 12-13% of both N and P, while Mexico is estimated to contribute about 5% of the total of these nutrients from all modeled watersheds.

Table 8. Percentage of Erosion, Nitrogen, and Phosphorous Sources by Country within MAR Drainage

Country	Erosion (Percent of total)	Nitrogen (Percent of total)	Phosphorous (Percent of Total)
Honduras	83%	55%	60%
Guatemala	17%	26%	25%
Belize	1%	13%	12%
Mexico	0%	6%	4%

Source: WRI, 2006

Conclusion

The analysis presented in this paper provides a regional overview of the magnitude and pattern of sediment and nutrient delivery to coastal waters of the MAR. Based on this analysis, we conclude that:

Policy action is needed to address the contributions from agricultural lands.
Most of the sediment and nutrients delivered to the MAR from watersheds in the region come from agricultural lands in Honduras and Guatemala. The contributions of Belize and Mexico are substantially less, but still pose a threat along their coasts. Many promising initiatives to decrease pollution within the region are underway. These include sustainable forestry management and integrated watershed management in Guatemala; improved land use planning, reforestation and soil conservation programs in Honduras; and similar initiatives in Belize and Mexico. These important efforts need public support, recognition, and continued investment.

Results can help identify areas in need of better agricultural management.
This analysis identified vulnerable areas where conversion to an erosive land use should be avoided, or where converted conservation practices should be implemented. It also identified areas with high erosion and nutrient runoff, where better agricultural management practices should be targeted.

Policies that support sustainable development can reduce sediment and nutrient delivery.
As evidenced by our findings, land-use planning, integrated watershed management, and other policies that support sustainable development can help to lessen erosion and pollution runoff, thereby decreasing sediment and nutrients reaching the MAR.

More detailed modeling is needed to create more accurate information at higher resolutions.
Regional-scale analyses are useful for providing an overview and for prioritizing areas in which action is needed. However, local analyses provide more detailed and accurate information that policymakers need in order to target their interventions. The tools provided on the data CD, *Watershed Analysis for the Mesoamerican Reef* (WRI/ICRAN MAR project, 2006), allow users to perform more detailed analyses of sediment and nutrient delivery within smaller areas in the MAR region, such as at the watershed level.

More specifically, the N-SPECT model can be applied to individual watersheds or groups of watersheds using the 90m elevation data provided or with the user's own data. More detailed local modeling will improve the accuracy of the results, by using higher resolution data on slopes and land cover, and by calibrating the model to local soils and precipitation regimes.

It would be valuable to extend the current analysis to include the effect of improved agricultural management practices on erosion and pollutant runoff. Such an extension

would require detailed information on how each practice influences erosion rates and pollutant runoff coefficients. Once such information is available, it should be possible to use N-SPECT to evaluate reductions by treating each management intervention on each land cover type as a unique category with specific erosion and pollutant runoff characteristics. For example, citrus groves with cover crops planted to reduce erosion might be treated as a separate category.

Enhancements to the model are needed to improve the accuracy of sediment and nutrient delivery estimates.
We recommend that the N-SPECT model developers make investments to enhance the model to account for sediment redeposition and nutrient loss during transport within watersheds. This would result in a modeling tool that is more capable of estimating actual sediment and nutrient delivery at river mouths. The accuracy of these estimates could then be evaluated with field measurements.

Analyses such as these can help to evaluate progress in reducing land-based sources of threat.
A number of national initiatives, as well as donor-funded regional initiatives, seek to reduce or mitigate threats to the MAR. This analysis can help these initiatives to estimate their progress by giving them the information they need to ensure they are moving in the right direction.

Transnational natural resource management can be strongly supported by analyses such as these.
To mitigate and reduce the land-based threats to the MAR, constructive regional cooperation among a variety of stakeholders is necessary. Examples include the multilateral cooperation agreements among the four countries involved in this analysis, and agreements between the agriculture and tourism sectors and civil society groups. This tool works across borders and sectors, creating information that allows productive discussion on threat origins and potential mitigation measures.

The International Coral Reef Action Network (ICRAN) collaboration will continue to support the application of analysis results and modeling tools in the region. For more information on ICRAN, please visit: **www.icran.org.**

For questions or comments about this analysis please contact:

Lauretta Burke (lauretta@wri.org) and Zachary Sugg (zsugg@wri.org)
World Resources Institute
10 G St. NE,
Washington, DC 20002
+1 (202) 729-7600
On the web at: reefsatrisk.wri.org

Additional Technical Notes

1) **Watershed Delineation -** We delineated watersheds at 250m resolution at WRI using both N-SPECT and ArcMap. We needed to run the delineation in N-SPECT so that it would accept the DEM, and be able to detect river locations (where flow accumulates) and watershed boundaries. N-SPECT, however, lumps coastal watersheds, which is not useful for examining specific river discharge or sediment delivery. To get around this, we extracted the flow direction output from N-SPECT and used this as the basis for deriving more detailed basins in ArcMap (using the BASINS command in ArcTools\Spatial Analyst). We also ran Flow Accumulation in ArcMap to identify rivers and streams. We combined flow accumulation and basins to identify the point of high flow in each basin, and assigned this point as the "pour point" or river mouth.

2) **Slope Length in N-SPECT.** We did two watershed delineations in N-SPECT. One was based on the "burned," or hydrologically corrected DEM and resulted in a good watershed delineation. The other was based on a "raw" or unburned DEM and resulted in a poor watershed delineation, but more accurate slope and "slope length" calculations. (A burned DEM has an artificially steep slope along the burned rivers.) As such, we ran both watershed delineations, and copied the slope-length grid (called LSgrid in N-SPECT) from the "raw" delineation to the "burned" delineation. We then ran all future processes on the "burned" accurate delineation, which now includes a more accurate slope-length grid.

3) **R-**factor – the equation used for R-factor :

R = 3786.6 + 1.5679 * (Precip in mm) – 1.9809 * (Elevation in m)

R is in metric units (MJ * mm * ha-1 * h-1 * y-1) or (megajoule * mm per hectare per hour per year.) However, N-SPECT requires US units: (hundreds of feet * tonf * inch * acre-1 * hour-1 * year-1). One can convert from metric to US units by dividing by 17.02.

Reference: USDA-ARS Agriculture Handbook No. 703

Modelamiento Hidrológico de la Descarga de las Cuencas Hidrológicas en el Arrecife Mesoamericano

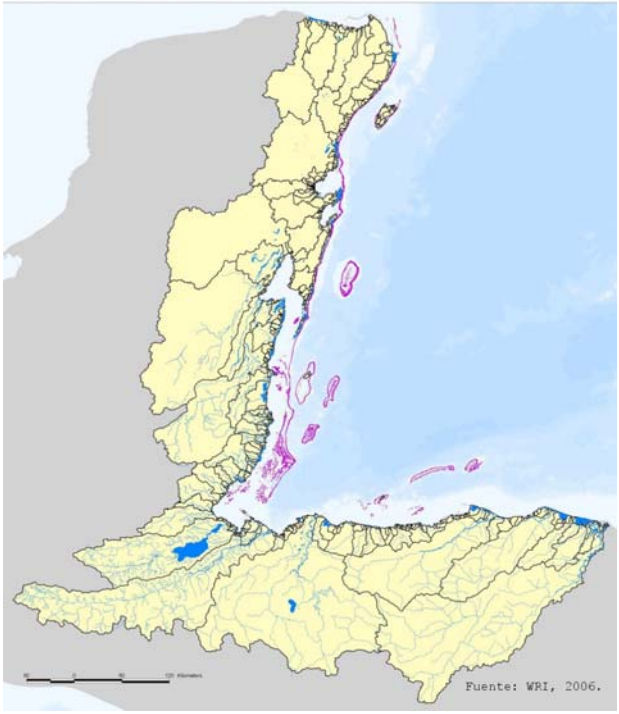
Síntesis del Análisis - 1ero de Diciembre de 2006

Por: Lauretta Burke and Zachary Sugg

Con contribuciones de:
Will Heyman and Shin Kobara (Universidad de Texas A& M University)
Laurent Cherubin, Christopher Kuchinke, Claire Paris, and Johnathan Kool (Universidad de Miami)

Traducción al Español de Carolina de Rosas y Ruth Noguerón, WRI

Cuencas hidrológicas de la región coralina Mesoamericana



El proyecto Alianza para el Arrecife Mesoamericano de ICRAN (ICRAN-MAR) es apoyado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y la Fundación de las Naciones Unidas (UNF). El proyecto es ejecutado en conjunción con el Programa Ambiental del Caribe del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PAC-PNUMA).

La elaboración del componente de cuencas hidrológicas fue una colaboración entre el Instituto de Recursos Mundiales (WRI), el Centro Mundial de Vigilancia de la Conservación del PNUMA (UNEP – *World Conservation Monitoring Centre* -WCMC) y el Fondo Mundial para la Naturaleza (*World Wildlife Fund -WWF)*.

Con apoyo de:

Parte de la Alianza ICRAN MAR:

Colaboradores:

Contenido

Figuras 1
Tablas 2
Siglas 3
Agradecimientos 4
Antecedentes del Proyecto 7
Hallazgos Clave 8
Panorama de la Metodología 11
Delineación de las Cuencas Hidrológicas 11
Base de datos de Sistemas de Información Geográfica (SIG) 14
Modelos de Descarga de Sedimentos y Erosión 16
Erosividad Pluvial y Precipitación 19
Vulnerabilidad del Terreno a la Erosión 20
Modelos de Escorrentía y Descarga de Contaminantes 20
Modelo de Circulación 22
Calibración y Validación del Modelo 23
Limitaciones del Análisis 27
Resultados del Análisis 28
1) Descarga de Sedimentos y Contaminantes en Base a la Cobertura Terrestre Actual (2003/04) 28
2) Comparación de Resultados entre la Cobertura Terrestre Actual (2003/04) y la Cobertura Terrestre Hipotética Natural 29
3) Comparación entre la Cobertura Terrestre Actual y los tres Escenarios de Desarrollo para el Año 2025 31
4) Eventos Extremos 33
5) Transporte de Materia Suspendida en el Arrecife Mesoamericano 34
6) Vulnerabilidad Terrestre a la Erosión 38
7) Fuentes Locales de Sedimento y Nutrientes 39
Conclusión 40
Notas Técnicas Adicionales 43

Figuras

Figura 1. Cuencas Hidrológicas de la Región del Arrecife Mesoamericano 12
Figura 2. Factor de Erosividad del Suelo (Factor-K) 18
Figura 5. Relación Temporal entre los Valores Estimados de Descarga de Ríos Usando N-SPECT y el Coeficiente de Absorción de Materia Detrital de Color (CDM), derivado de Imágenes de Satélite del Norte de Honduras 26
Figura 6. Descarga de Sedimentos y Nitrógeno por Cuenca Hidrológica (Cobertura Terrestre Actual) 29
Figura 7. Descarga de Sedimento Modelada a Partir de Cobertura Terrestre Actual y Natural 31
Figura 8. Distribución de Cobertura Terrestre dentro de Cada Escenario 32
Figura 9. Extensión de la Pluma de CDM para el 14 de Noviembre de 2000 34

Figura 10. Valores Estimados de Descarga Mensual Derivados de N-SPECT 35
Figura 11. Simulación de la Concentración de Materia Suspendida a lo Largo de la Región del Arrecife Mesoamericano para el Mes de Diciembre (Escenarios de Cobertura Terrestre Actual y Sustentabilidad Primero)..... 36
Figura 12. Concentración Máxima Simulada a lo Largo de la Región del Arrecife Mesoamericano Durante un Año (Escenarios de Cubierta Terrestre Actual y Sustentabilidad Primero)..... 37
Figura 13. Mapa de la Concentración de Materia Suspendida en el Arrecife Mesoamericano (Escenarios de Cobertura Terrestre Actual y Sustentabilidad Primero) 37
Figura 14. Vulnerabilidad del Terreno a la Erosión 38
Figura 15 Contribución Promedio de Sedimento, Nitrógeno y Fósforo a Nivel de Sub-Cuencas……..…39

Tablas

Tabla 1. Coeficientes del Factor-C en N-SPECT 18
Tabla 2. Coeficiente de Curvas de Descarga Usados en el Modelo N-SPECT por Tipo de Cobertura Terrestre y Grupo de Suelo Hidrológico..... 21
Tabla 3. Coeficientes de Contaminantes: Fósforo, Nitrógeno, y Total de Sólidos Suspendidos (TSS)..... 21
Tabla 4. Comparación de Cobertura Terrestre Natural y Actual (Porcentaje en Cada Tipo de Cobertura) 30
Tabla 5. Comparación de los Resultados Regionales Usando Modelos Anuales en Cobertura Terrestre Actual y Cobertura Terrestre Natural 30
Tabla 6. Comparación entre Escenarios de Cobertura Terrestre (Porcentaje de Cada Tipo de Cobertura) 32
Tabla 7. Comparación de Resultados Regionales entre los Modelos Anuales de Cobertura Terrestre Actual y los Tres Escenarios para 2025 33
Tabla 8. Porcentaje de las Fuentes de Erosión, Nitrógeno y Fósforo por País dentro de la Región del Arrecife Mesoamericano 40

Siglas

CDM	Materia Detrital de Color (*Colored Detrital Matter*)
DEM	Modelo de Elevación Digital (*Digital Elevation Model*)
GEO	Panorama Ambiental Global (*Global Environmental Outloook*)
ICRAN	Red Internacional de Acción para los Arrecifes de Coral (*International Coral Reef Action Network*)
ICRAN-MAR	Proyecto del ICRAN en el Arrecife Mesoamericano (*Mesoamerican Reef*)
N-SPECT	Herramienta para la Comparación de la Descarga de Contaminantes y Erosión (*Nonpoint-Source Pollution and Comparison Tool*)
PAC-PNUMA	Programa Ambiental del Caribe del PNUMA
PNUMA	Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente
ROMS	Systema para el Modelaje Oceánico Regional (*Regional Ocean Modeling System*)
RUSLE	Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelo (*Revised Universal Soil Loss Equation*)
SeaWiFS	Sensor de Observación Amplia del Mar (*Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor*)
SOA	Algoritmo de Optimización Espectral (*Spectral Optimization Algorithm*)
SOTERLAC	Base de Datos de Suelo y Terreno para América Latina y el Caribe (*Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean*)
TSS	Total de Sólidos Suspendidos (*Total Suspended Solids*)
USAID	Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (*United States Agency for International Development*)
WCMC	Centro Mundial de Vigilancia y Conservación del PNUMA (*World Conservation Monitoring Centre*)
WRI	Instituto de Recursos Mundiales (*World Resources Institute*)
WWF	Fondo Mundial para la Naturaleza (*World Wildlife Fund*)

Agradecimientos

La realización de este CD de datos fue posible gracias a las generosas contribuciones de la Fundación de las Naciones Unidas (*United Nations Foundation*), y la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) dentro de la Alianza para el Arrecife Mesoamericano (*Mesoamerican Reef* – MAR) de la Red Internacional de Acción para los Arrecifes de Coral (*International Coral Reef Action Network* -ICRAN). El Instituto de Recursos Mundiales agradece y reconoce a las múltiples organizaciones que colaboraron y los colegas que contribuyeron a este proyecto y a la producción de este CD, incluyendo ICRAN, UNEP-World Conservation Monitoring Center (WCMC), y el Fondo Mundial de la Naturaleza (WWF). Agradecemos a Emil Cherrington (*Belize Coastal Zone Management Institute* y Centro del Agua del Trópico Húmedo de América Latina y el Caribe - CATHALAC) por el desarrollo de los datos y su guía en asuntos de datos espaciales; agradecemos también a Joep Luijten (consultor para UNEP-WCMC) y Lera Miles (UNEP-WCMC) por los modelos usados para crear escenarios del uso de suelo; gracias a Eric van Praag (consultor para UNEP-WCMC) por facilitar los talleres de instrucción y política para este proyecto, Liza Agudelo y Armeid Thompson (proyecto ICRAN MAR) y Kristian Teleki y Nic Barnard (ICRAN) por su apoyo y aliento a lo largo del proyecto. Gracias a Will Heyman y Shin Kobara (Universidad A&M de Texas) por su asistencia en la calibración del modelo hidrológico, y a Jamie Carter y Dave Eslinger (*US National Oceanographic and Atmospheric Administration*) por su guía en la implementación del modelo N-SPECT. Agradecemos también a Claire Paris, Laurent Cherubin, Christopher Kuchinke, y Johnathan Kool (Universidad de Miami) por adaptar un modelo de circulación con el propósito de examinar la dispersión de sedimentos a lo largo del Arrecife Mesoamericano. Agradecemos también a Néstor Windevoxhel y Alejandro Arrivillaga (*The Nature Conservancy*) por su apoyo conjunto en la implementación del modelo de circulación. Gracias a Ramón Frutos (Servicio Meterológico de Belice) por la información sobre huracanes, y Jan Merman (Estudios Tropicales de Belice) por información sobre cobertura de terreno y cuencas hidrológicas. Gracias al projecto Sistema del Arrecife de Barrera Mesoamericano (*Mesoamerican Barrier Reef System* (MBRS) del Banco Mundial/GEF que ayudó a identificar el modelo N-SPECT como una herramienta valiosa para este estudio. Gracias a Melanie McField (WWF e Institución Smithsonian) por sus constructivos comentarios, y su guía analizando los impactos del proyecto MAR; gracias a José Vásquez, Silvia Marín, Shalini Cawich y Gina De Ferrari (WWF) por su valiosa asistencia bajo la asociación ICRAN. Gracias a Serge Andrefouet por la valiosa información sobre arrecifes de coral para el proyecto MAR. Gracias a Suzie Greenhalgh, Daniel Prager, Janet Ranganathan, Isabel Munilla, y David Jhirard (WRI) por sus valiosas revisiones y comentarios; gracias a Jenny Guiling (WRI) por la información para calibrar los resultados del modelaje. Gracias a Ron Valenzuela (WRI) por la edición de este documento, y particularmente gracias a Carolina de Rosas y Ruth Noguerón por la traducción al español de este documento.

Este CD fue hecho posible gracias al apoyo de la oficina del Programa Guatemala-Centroamérica, de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), bajo los términos del contrato número 596-G-00-03-00163-00. Las opiniones expresadas en este documento pertenecen solamente a los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) o UNEP.

Modelamiento Hidrológico de la Descarga de las Cuencas Hidrológicas en el Arrecife Mesoamericano

Resumen del Proyecto

Este documento describe la metodología y los resultados de un análisis hidrológico implementado por el Instituto de Recursos Mundiales (WRI) como parte de la colaboración de la Alianza para el Arrecife Mesoamericano (*Mesoamerican Reef* – MAR) de la Red Internacional de Acción para los Arrecifes de Coral (ICRAN). El objetivo del análisis fue de cuantificar, basándose en amenazas terrestres, el impacto de las alteraciones humanas al paisaje en el Arrecife Mesoamericano para informar la planificación de uso de suelo, políticas y prácticas agrícolas, identificación de prioridades para la conservación, y esfuerzos para mitigar riesgos.

Durante dos años, WRI trabajó con muchos colaboradores en la región para evaluar la descarga de sedimentos y nutrientes terrestres en más de 400 cuencas hidrológicas que drenan en la región adyacente al Arrecife Mesoamericano. El análisis evalúa la cantidad de sedimento y nutrientes (Nitrógeno y Fósforo) proveniente de cada lote del terreno; la cantidad de sedimento erosionado y nutrientes que llegan a la boca de los ríos (punto de descarga costera); y la cantidad de sedimento que llega a los arrecifes coralinos. Además, el análisis proporciona estimaciones sobre el incremento de sedimento y nutrientes que resultan de las actividades humanas, y predice el transporte futuro de sedimentos y nutrientes (en 2025) basándose en diferentes escenarios de uso de suelo. Este es el primer análisis de este tipo y nivel de detalle para la región del Arrecife Mesoamericano.

Los resultados proporcionan una perspectiva preliminar de los patrones de transporte y descarga de sedimento y nutrientes a nivel regional, e indican cómo las alteraciones humanas en el paisaje terrestre pueden influir estos patrones. Para asegurarse de que los resultados de este proyecto y los métodos de análisis apoyan acciones concretas en la región, WRI pone a disposición del público en general la información, el método analítico y las herramientas de modelaje; con el mismo objetivo, WRI ha conducido talleres de capacitación de usuarios en la región. A partir de ésta capacitación, los usuarios regionales pueden implementar análisis más detallados y enfocados a áreas más pequeñas calibrando los modelos a las condiciones locales.

Toda la información utilizada en este análisis, todos los resultados del modelo así como los metadatos se encuentran en el CD *Análisis de Cuencas Hidrológicas en el Arrecife Mesoamericano*, WRI/ICRAN Proyecto MAR, 2006. Este documento comienza con una descripción de la colaboración WRI-ICRAN, un resumen de los hallazgos clave del análisis así como una descripción de los métodos analíticos y un resumen de los resultados del análisis.

Antecedentes del Proyecto

Compartido por México, Belice, Honduras y Guatemala, el Arrecife Mesoamericano se extiende sobre 1,000 km y es el arrecife continuo más grande del Hemisfero Occidental. La alteración de los paisajes terrestres para el desarrollo, construcción de caminos, o agricultura puede tener impactos adversos en los arrecifes coralinos a través del incremento de transporte de sedimentos, nutrientes y otros contaminantes a las aguas costeras. Las amenazas del clareo de terrenos son más altas en áreas donde el relieve es más vertical, la precipitación pluvial es intensa y los suelos erosivos.

El uso apropiado de suelo es esencial para el manejo de las cuencas hidrológicas para poder minimizar el trasporte de sedimentos, nutrientes, y otros contaminantes a los arrecifes coralinos. En la región mesoamericana, más de 300,000 hectáreas de terreno son destinadas a la producción de bananas, aceite de palmera, caña de azúcar, cítricos, y ananá. Tanto sedimentos ya erosionados, como residuos de fertilizantes y pesticidas utilizados en este tipo de industrias, se filtran a través de ríos y corrientes y entran a las aguas costeras del Arrecife Mesoamericano.

Como parte del proyecto de la Alianza para el Arrecife Mesoamericano (MAR) de la Red Internacional de Acción para los Arrecifes de Coral (ICRAN), el **Instituto de Recursos Mundiales (WRI)** colaboró con el **Centro Mundial de Vigilancia de la Conservación del PNUMA (UNEP-*World Conservation Monitoring Center* - WCMC)** y el **Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF)** para conducir un análisis comprensivo de cuencas hidrológicas; este análisis complementa otras actividades del proyecto MAR sobre pesquerias sostenibles y turismo sostenible.

El análisis de las cuencas hidrológicas realizado por el proyecto ICRAN MAR fue desarrollado para producir información y herramientas que buscan examinar los impactos posibles que los diferentes usos de suelo y distintas opciones en desarrollo podrían tener en la región, como así también los impactos asociados con la calidad del agua en la región del Arrecife Mesoamericano. El proyecto tiene los siguientes objetivos:

- Relacionar diferentes modelos de uso de suelo dentro de las cuencas hidrológicas con los impactos en los arrecifes coralinos, e identificar los arrecifes que corren alto riesgo de degradación;
- Identificar las cuencas hidrológicas más vulnerables a la erosión y aquellas que aportan la mayor cantidad de sedimentos y contaminantes a las aguas costeras;
- Adaptar herramientas para poder pronosticar tendencias importantes, poder evaluar diferentes opciones en decisiones políticas o de desarrollo, y poder facilitar mejorías en el manejo de las tierras a través de la región;
- Apoyar nuevas relaciones y alianzas estratégicas con grupos claves como gobiernos locales, compañías agro-industriales de gran nivel, así como comunidades agrícolas independientes;
- Utilizar los resultados de los modelos y herramientas de diagnóstico para asistir en la educación y promover el uso, por parte de ciertos grupos de interés, de “mejores prácticas de manejo” para reducir los impactos en las costas y los recursos marítimos.

El proyecto de cuencas hidrológicas ICRAN-MAR incluye componentes analíticos que investigan los cambios en la cobertura terrestre y los impactos relacionados con la descarga de los ríos**,** la erosión, la descarga de sedimentos y contaminantes, y el transporte dentro de las aguas costeras. El proyecto también incluye actividades directas con negocios agrícolas para implementar mejores prácticas de manejo. Durante la ejecución del proyecto se consultaron muchos colaboradores locales en relación con el manejo de la información, la información de entrada del modelo y la evaluación, y en las prácticas de manejo agrícolas. Tres socios de ICRAN colaboraron en este esfuerzo:

- UNEP-WCMC – desarrolló los escenarios de la cobertura terrestre y proporcionó bases de datos cuya información fue sumada a los modelos hidrológicos;
- WRI – implementó la delineación de las cuencas hidrológicas y el análisis hidrológico para la región del Arrecife Mesoamericano; WRI también realizó el análisis de la vulnerabilidad a la erosión, y coordinó el modelo de circulación a lo largo del Arrecife Mesoamericano;
- WWF – lideró el esfuerzo de diálogo con negocios agrícolas para implementar mejores prácticas de manejo.

El trabajo de WWF con negocios agrícolas se enfoca en la reducción de pesticidas de prioridad en el ambiente marino del Arrecife Mesoamericano y en el control de la erosión del suelo desde el punto de vista del sector comercial agrícola. WFF está trabajando en conjunto con socios en el cultivo de la banana, el ananá, cítricos**,** y el azúcar. El análisis realizado bajo este proyecto ayuda a WWF y a otras organizaciones a establecer prioridades para poder alcanzar mejores prácticas de manejo de las tierras, así como para guiar la planificación del uso de las tierras.

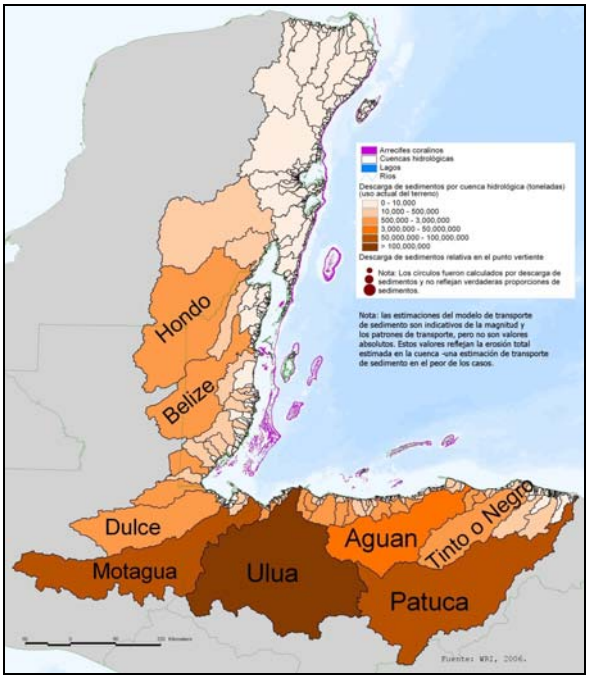
Hallazgos Clave

Este análisis hidrológico ayuda a integrar una gran variedad de información, y adapta herramientas de modelaje para hacer un análisis inovativo y regional del Arrecife Mesoamericano. Los resultados regionales presentados en este documento deben ser considerados como preliminares y como un indicador general de los patrones y la magnitud de la erosión y descarga de sedimentos y nutrientes a través de la región. Un aspecto importante de este proyecto es el proporcionar las herramientas de modelaje a diferentes colaboradores en la región, de manera que ellos puedan aplicar el análisis con mayor resolución y proporcionen resultados más detallados para regiones más pequeñas dentro de la región del Arrecife Mesoamericano. Esto permitirá también el refinamiento y una mejor calibración del modelo para las condiciones locales dentro de la región del Arrecife Mesoamericano.

Sobre el origen de los sedimentos y los nutrientes que llegan al Arrecife Mesoamericano:

- La mayoría del sedimento y nutrientes transportados por las cuencas hidrológicas que desembocan en el Arrecife Mesoamericano se originan en Honduras. Se estima que más del 80 por ciento del sedimento, y más de la mitad de los nutrientes (Nitrógeno y Fósforo) se originan en Honduras.
- Guatemala fue identificada como la fuente de cerca de un sexto (1/6) de todos los sedimentos y casi un cuarto (1/4) de todo el Nitrógeno y Fósforo que entra a las aguas costeras a lo largo del Arrecife Mesoamericano.
- El modelo indica que, comparado con otros países, un porcentaje relativamente menor de sedimento a nivel regional proviene de Belice y México. Belice contribuye con entre 10-15 por ciento de los nutrientes, y se estima que México contribuye con un 5 por ciento de los nutrientes para todos las cuencas del modelo. Es probable que el porcentaje para México este sub-estimado puesto que la contribución de los ríos subterráneos no se consideró en el modelaje.
- De las 400 cuencas hidrológicas de la región del Arrecife Mesoamericano, la cuenca del Río Ulua en Honduras contribuye con la mayor cantidad de sedimentos, Nitrógeno y Fósforo. Otros ríos grandes que transportan sedimentos y nutrientes en cantidades significativas son el Río Patuca (en Honduras), el Río Belice (en Belice), y el Río Tinto ó Negro (en Honduras).

Figura A. Transporte de Sedimento Annual de las Cuencas Hidrológicas del Arrecife Mesoamericano (Cobertura terrestre actual).



La escorrentía, erosión y transporte de nutrientes a las aguas costeras está incrementando:

- Como resultado de las alteraciones humanas en el paisaje terrestre, la escorrentía, y las descargas asociadas en la desembocadura de los ríos casi se ha duplicado; la descarga de sedimentos en la desembocadura de los ríos ha incrementado por un factor de veinte; la descarga de Nitrógeno ha incrementado por un factor de tres, y la descarga de Fósforo por un factor de siete (las proporciones están basadas en los resultados del modelo usando información de uso de suelo actual (2003/2004) y cobertura terrestre natural hipotética (no alterada).

Los posibles impactos de las diferentes opciones de desarrollo y de uso de suelo varían:

- De acuerdo con el escenario de uso de suelo que favorece los mercados y políticas ambientales limitadas, la descarga de nutrientes muy probablemente incrementará un 10 por ciento en el 2025, mientras que la descarga de sedimento podría incrementar un 13 por ciento o más.
- Si se implementan políticas ambientales que favorecen el desarrollo sostenible, la descarga de nutrientes y sedimentos probablemente será reducida por al menos 5 por ciento de los niveles actuales, promoviendo la recuperación de corales degradados.
- La implementación de mejores prácticas de manejo agrícolas resultaría en reducciones en la descarga de sedimento y nutrientes más allá de aquellas evaluadas en este estudio puesto que este estudio se ha enfocado solamente en los efectos derivados de los cambios en la cubierta terrestre.

Panorama de la Metodología

En colaboración con instituciones de la región del Arrecife Mesoamericano, WRI:

- Implementó la delineación de cuencas hidrológicas en todas las tierras que drenan en la región del Arrecife Mesoamericano;
- Implementó un análisis hidrológico para examinar las fuentes de sedimentos y nutrientes provenientes de toda ésta área de drenaje, así como también la descarga de sedimentos y nutrientes en aguas costeras;
- Aplicó esta herramienta de análisis hidrológico para examinar la descarga de sedimentos y nutrientes usando varios escenarios de cobertura terrestre (cobertura terrestre "actual", cobertura terrestre original o "natural", y tres escenarios de cobertura terrestre para el año 2025);
- Incorporó los resultados del análisis hidrológico en un modelo de circulación para examinar el transporte de sedimentos a través de la región del Arrecife Mesoamericano; y
- Trabajó con varios colaboradores en la calibración y validación de los resultados de los modelos.

Delineación de las Cuencas Hidrológicas

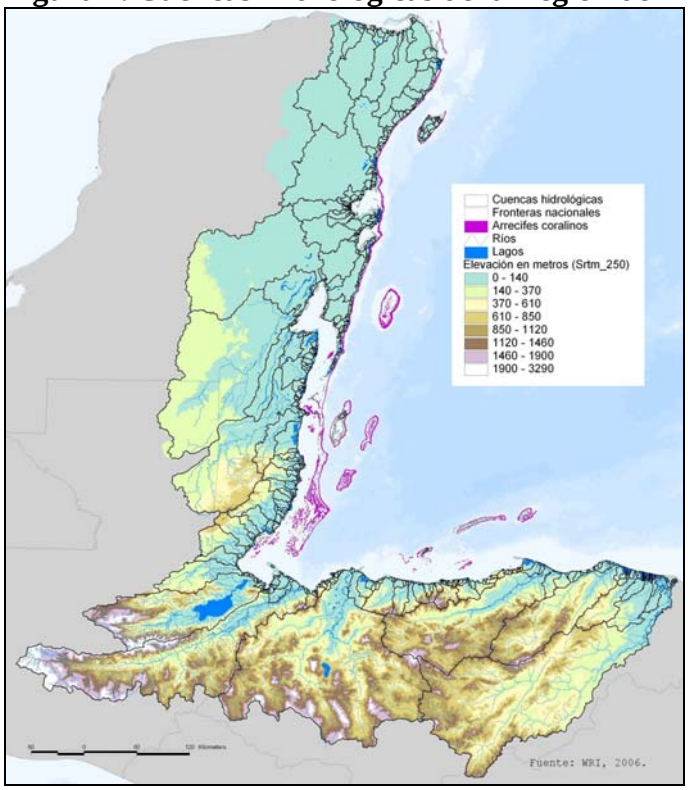
Las cuencas hidrológicas son una unidad esencial de este análisis, ya que constituyen el enlace entre un área terrestre con la corriente y la red fluvial, y el punto de descarga en el mar. Las cuencas hidrológicas fueron delineadas a partir de un modelo de elevación digital (*Digital Elevation Model* - DEM) corregido a una resolución de 250m. El DEM se basa en una resolución de 90m establecido por la Misión SRTM de NASA (*Shuttle Radar Topography* - SRTM), el cual fue promediado y proyectado a una resolución de 250m para poder construir los modelos hidrológicos y de cobertura terrestre utilizados en este proyecto. Ya que los datos de elevación provenientes de radares poseen inexactitudes, como por ejemplo, toman en cuenta la parte superior de los árboles y construcciones como parte de la elevación, fue necesario "corregir" esta información como parte del proceso de delineación de las cuencas hidrológicas. Varios ríos y lagos mapeados fueron superpuestos en el DEM, a través de un proceso que denominado "grabado" de DEM. Los ríos (como líneas) fueron proporcionados por la Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD) y los polígonos de lagos y lagunas fueron proporcionados por WWF; estos fueron utilizados para desarrollar una base de datos para la corrección del DEM. La cuadrícula de celdas fue superpuesta (a 20m de elevación) dentro del DEM[1] para capturar la descarga del agua de acuerdo con la inclinación del terreno. Esta versión "grabada" de la base de datos, fue utilizada para la delineación de cuencas hidrológicas en el programa ArcMap desarrollado por el Instituto de Investigación de Sistemas Ambientales (*Environmental Systems Research Institute* -

[1] Ver los metadatos en el CD *Watershed Analysis for the Mesoamerican Reef*, para fuentes de datos, así como también la información de SIG usados para la corrección.

ESRI). Por cada celda de la retícula—equivalente a 250m en el DEM—la dirección de la corriente y el número de celdas dentro de cada retícula (acumulación caudal) fueron identificadas; de la misma manera, se identificaron las celdas que corresponden a cada cuenca hidrológica (área que desagua en un punto particular de la costa). Una retícula de 250m con una acumulación caudal máxima en cada cuenca fue identificada como "punto de descarga", en el Arrecife Mesoamericano. Las cuencas con un área menor a 5 km^2 fueron excluidas. Más de 430 cuencas hidrológicas, de por lo menos 5 km^2 de área fueron identificadas. (Un suplemento de notas técnicas acerca de la delineación de cuencas hidrológicas se encuentra al final de esta publicación).

Este producto final "delineaciones de cuencas hidrológicas en la región del Arrecife Mesoamericano" se benefició de varias rondas de revisiones y de información adicional proporcionada por varios proyectos ya existentes. La delineación de las cuencas hidrológicas fue revisada una vez más durante el taller de cuencas hidrológicas organizado por ICRAN MAR en Belice, en Agosto de 2006. Es importante notar que la delineación de las cuencas hidrológicas en la región MAR es confiable, pero la delineación en la región de Yucatán es inexacta dada la extensiva topografía cárstica con ríos subterráneos y la falta de aguas superficiales.

Figura 1. Cuencas Hidrológicas de la Región del Arrecife Mesoamericano



Modelo hidrológico

Las amenazas provenientes de fuentes de sedimentos y nutrientes terrestres fueron evaluadas usando la herramienta *Nonpoint Source Pollution and Erosion Comparison Tool* (N-SPECT) desarrollada por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (*US National Oceanographic and Atmospheric Administration - NOAA*). N-SPECT es un programa de dominio público que corre como una extensión opcional dentro del programa ArcMap de ESRI. Esta herramienta combina información del ambiente físico (elevación, inclinación, suelos, precipitación y cobertura terrestre) para derivar estimaciones de fuentes de descarga, erosión y contaminantes (Nitrógeno, Fósforo, y Total de Sólidos Suspendidos) a través del terreno, así como también estimaciones de acumulación y concentración de sedimentos y contaminantes en las corrientes y redes fluviales. N-SPECT fue implementado a una resolución de 250m para la región del Arrecife Mesoamericano. Esto quiere decir que el modelo N-SPECT evalúa cada celda de la retícula con resolución de 250m (6.25 hectáreas) en relación con su contribución a la escorrentía, sedimentos, y descarga de contaminantes dentro de la cuenca hidrológica. Los resultados del análisis de dicha herramienta tienen el objetivo de ser usados como herramientas de protección para asistir en el entendimiento de los impactos que tienen la toma de decisiones en la calidad del agua, y finalmente, en la salud de los arrecifes coralinos cercanos a las costas.

El modelo N-SPECT puede ser utilizado para evaluar descargas anuales o de acontecimientos específicos, erosión, y la descarga de sedimentos y contaminantes. N-SPECT puede ser modificada para evaluar estas descargas de manera mensual. La herramienta puede calcular la acumulación de descarga, sedimentos, o contaminantes en el terreno (esta es una función típica) o calcular "efectos locales", es decir cuánto sedimento, contaminantes, o escorrentía provienen de cada celda de la retícula. Todas estas opciones fueron utilizadas en el análisis de amenazas terrestres a lo largo de la región del Arrecife Mesoamericano.

a) **Descargas Anuales –** Para la región del Arrecife Mesoamericano, el modelo N-SPECT fue utilizado para evaluar escorrentía anual, descarga de sedimentos y nutrientes asociados con diferentes escenarios de cobertura terrestre – cobertura terrestre actual (años 2003/04), cobertura terrestre hipotética "natural", y tres posibles escenarios de cobertura terrestre para el año 2025. Durante estos periodos "anuales", el modelo N-SPECT fue utilizado usando la elevación, inclinación, y precipitaciones anuales como parámetros constantes. Solamente la información sobre el tipo de cobertura terrestre varió para evaluar la influencia de dicha variable sobre la descarga de sedimentos y nutrientes.
b) **Descargas mensuales** – El modelo N-SPECT también fue utilizado usando información de precipitación anual para derivar estimaciones mensuales de escorrentía y las descargas de sedimentos en la desembocadura de los ríos; estos resultados constituyeron datos de entrada esenciales para el modelo de circulación de la región que se implementó mensualmente.
c) **Efectos locales / fuentes de contaminación** – El modelo N-SPECT fue utilizado en el modo "efectos locales" usando información sobre la cobertura terrestre actual (año 2003/04) para evaluar la cantidad de sedimentos y nutrientes

(Nitrógeno y Fósforo) que se originan desde cada celda de la retícula (cada celda representa 250m), independientemente de las contribuciones provenientes de celdas adyacentes y/o de río arriba.

d) **Tormentas** – El modelo N-SPECT también fue utilizado para examinar escorrentía y descargas de sedimentos y nutrientes asociados a la ocurrencia de huracanes. Esta aplicación utiliza la característica particular de N-SPECT "efecto de tormenta", que utiliza los mismos datos de elevación, inclinación, y suelo que las pruebas anteriores, así como también la misma cobertura terrestre actual (año 2003/04), e información sobre precipitacion locale para los diferentes días de tormentas.

Base de datos de Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Todas las bases de datos SIG utilizadas en el análisis hidrológico se encuentran en formato UTM, (*Universal Transverse Mercator* -UTM), con una proyección NAD1927 (Datum para Centroamérica). Toda la información de entrada y los resultados del modelo se encuentran disponibles en el CD de datos Análisis de las Cuencas Hidrológicas del Arrecife Mesoamericano (*Watershed Analysis for the Mesoamerican Reef*) del proyecto de WRI / ICRAN MAR, 2006.

La información de entrada utilizada en el análisis hidrológico incluye:

1) **Elevación** – Modelo de elevación digital de 250m, derivado de datos con una resolución de 90m establecido por *NASA Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM)
2) **Suelos** – la información sobre suelos provino de la Base de Datos de Suelo y Terreno para América Latina y el Caribe (*Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean* -SOTERLAC), en formato de polígonos.
3) **Precipitación** – la información de precipitaciones mensual provino de una base de datos de 1km de resolución global llamada *WorldClim*[2]. Esta base de datos proporciona promedios de precipitación a largo plazo. Para el uso de N-SPECT, todos los datos acerca de precipitación fueron convertidos a pulgadas.
4) **Cobertura terrestre** – cinco escenarios representativos de cobertura terrestre fueron utilizados para poder evaluar el impacto que tienen los cambios en cobertura terrestre sobre la descarga de sedimentos y nutrientes en la desembocadura de los ríos a lo largo de la región del Arrecife Mesoamericano.
    a. **Cobertura terrestre "Actual"** – Se utilizaron "Mapas de ecosistemas" nacionales de México, Guatemala, Honduras (2003) y Belice (2004) como base para el mapeo de la cobertura terrestre actual. Los datos de los cuatro países fueron unidos y convertidos a una resolución[3] de 250m.

---

[2] Ver 2005. Very High Resolution Interpolated Climate Surfaces for Global Land Areas. (14 páginas) Descripción del desarrollo de la base de datos de WorldClim, clima global. En *International Journal of Climatology. Robert J. Hijmans, et al*.on *Watershed Analysis for the Mesoamerican Reef* data CD, WRI / ICRAN MAR proyecto, 2006.

[3] Para algunas celdas "sin datos" sobre la cobertura terrestre a lo largo de la costa, se usó información sobre la cobertura terrestre de la celda más cercana. Además, en ciertas localidades, la clasificación de

b. **Cobertura terrestre "natural"** – La cobertura "original" o natural de Belice, Guatemala, y Yucatán provinieron de una base de datos vectorial creada por Pronatura (*Original land cover*).[4]

Cobertura terrestre en el año 2025. Se desarrollaron tres mapas de cambio en la cobertura terrestre desde 2005 al 2025 para la región del Arrecife Mesoamericano, basándose en los procesos resultantes de tres escenarios: Mercados primero, Políticas primero, y Sustentabilidad primero. Esta información provino del Informe Ambiental Global de PNUMA (*Global Environment Outlook* - GEO).[5] Estos escenarios modelan las diferentes trayectorias sociales, políticas y económicas en la región, haciendo énfasis en los resultados para el medio ambiente y el bienestar humano.

c. **Escenario de "Mercados primero" en la cobertura terrestre en el año 2025** – Este escenario de desarrollo comercial está basado en el informe *GEO Market First Scenario* para América Latina. En este escenario, la mayor parte del mundo adopta los valores y las expectativas que prevalecen en los países industriales de hoy. La riqueza de las naciones y las fuerzas del mercado dominan las prioridades políticas y sociales. Las políticas públicas están enfocadas en realizar esfuerzos para apoyar intereses comerciales y promover el intercambio de bienes y servicios. Las políticas sociales y del medio ambiente reciben poca atención o apoyo económico, ya que se asume que el crecimiento económico por sí mismo será suficiente para progresar. Este escenario muestra los porcentajes más altos de expansión agrícola. Los datos de cobertura terrestre de 250m que reflejan este escenario fueron desarrollados por UNEP-WCMC.

d. **Escenario de "Políticas primero" en cobertura terrestre en el año 2025** – Este escenario está basado en el *GEO Policy First Scenario* para América Latina. En este escenario las decisiones gubernamentales acerca

---

celdas de agua se hizo en base a datos provenientes de Pronatura, especialmente en cuerpos de agua en diferentes localidades de Belice, Guatemala y Yucatán.

[4] Las clases del terreno fueron reclasificadas para que sean iguales a las clases utilizadas por el análisis hidrológico de ICRAN MAR, y también convertidas a una resolución de 250m. Para Honduras, el mapa de ecosistemas de Honduras (2003) fue modificado de la siguiente manera: la cobertura del terreno en áreas "cultivadas" y "desarrolladas" fueron reclasificadas en base al tipo de cobertura de terrenos adyacentes, con la excepción de agua (no permite expandirse) y pantanos (solo permitido a expandirse si es debajo de 20m de elevación).

[5] La cuantificación en el cambio de la cobertura del terreno fue desarrollada importando información de GEO 4 a partir de los modelos desarrollados por *International Futures* e IMAGE, y acompañados por una serie de narraciones adaptadas a partir de los aportes del grupo para América Latina y el Caribe. Los mapas con escenarios de áreas protegidas se desarrollaron tomando en cuenta las políticas internacionales relacionadas al cubrimiento de biomasa y especies en peligro; dichas políticas se modelaron de manera diferente y de acuerdo con los objetivos definidos para cada escenario. El modelo CLUE-S fue utilizado para distribuir el cambio de la cobertura del terreno. Más información sobre esta metodología se puede encontrar en Luijten, J., Miles, L., Cherrington, E. (2006) *Land use change modelling for three scenarios for the MAR region*. Reporte técnico para el proyecto ICRAN MAR. UNEP-WCMC.

de ciertas iniciativas tienen el propósito de alcanzar metas específicas en los ámbitos sociales y del medio ambiente. Los esfuerzos a favor del medio ambiente y contra la pobreza actúan como balanza ante el *momentum* generado por el desarrollo económico a cualquier costo. Las ganancias y costos en el ámbito social y del medio ambiente se miden en regulaciones políticas, marcos regulatorios, y procesos de planificación. Estos son reforzados por incentivos fiscales como impuestos sobre carbono. El uso de la tierra comienza a ser regulada con más atención, especialmente alrededor de los corredores ribereños. Los datos de 250m de resolución asociados con la cobertura terrestre fueron desarrollados por UNEP-WCMC.

e. **Escenario de "Sustentabilidad primero" en cobertura terrestre en el año 2025** – Este escenario está basado en el *GEO Policy First Scenario* para América Latina; una nueva paradoja del medio ambiente y el desarrollo emergen en respuesta al desafío de sustentabilidad, apoyado por nuevos valores e instituciones que son más equitativas. En este escenario prevalece un estado con visión futurista, donde ocurren cambios radicales, y en donde la manera en que la gente se relaciona entre sí y con el ambiente que los rodea estimula y apoya medidas y políticas sustentables y un comportamiento empresarial más responsable. El uso más eficiente de la energía, la tierra, y recursos materiales se destaca en este escenario. Hay esfuerzos para adoptar un camino ecológico a la planificación del uso de la tierra, con atención especial a la protección de las cuencas hidrológicas. Los datos de 250m de resolución asociados con la cobertura terrestre fueron desarrollados por UNEP-WCMC

Modelos de Descarga de Sedimentos y Erosión

El modelo N-SPECT evalúa la erosión anual de cada celda de la retícula basándose en la ecuación universal revisada de pérdida de suelos (*Revised Universal Soil Loss Equation* - RUSLE) desarrollada por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (*US. Department of Agriculture)*[6]. RUSLE combina la inclinación, precipitaciones, suelo, y cobertura terrestre para estimar las perdidas del suelo anuales para esa localidad.

[6] USDA Manual de Agricultura No. 703, que se encuentra en el CD de datos *Watershed Analysis for the Mesoamerican Reef*, WRI / ICRAN MAR proyecto, 2006.

Ecuación 1: RUSLE

Promedio anual de pérdida de suelos (toneladas/acres) = R * K * L * S * C * P

R – Factor de erosividad de la descarga pluvial
K – Factor de erosividad del suelo
*L*S – Factor de inclinación de la pendiente y de medida*
C –Factor de administración de cobertura
P – Factor de apoyo a prácticas

Las bases de datos introducidas anteriormente son elevación, suelo, precipitación, y cobertura terrestre. El modelo N-SPECT utiliza estos datos como base para derivar los factores que se utilizan en la ecuación RUSLE. Algunos de estos derivados son complicados y están descritos a continuación; las notas técnicas en la parte final de este informe incluyen información adicional. En síntesis:

- **Factor-LS –** Este factor ajusta las tasas de erosión en base a la topografía, asignando tasas más altas ó más largas a las pendientes más inclinadas y tasas menores o más cortas a las pendientes menos inclinadas.[7] Inclinación de la pendiente (S) y largo de la pendiente (L) derivadas del DEM y N-SPECT. La combinación de ambos resulta en una sola capa de SIG para el Factor-LS.
- **Factor K –** La base de datos de suelos SOTERLAC incluye el factor de erosividad (Factor-K), el cual representa la susceptibilidad del suelo a la erosión y las lluvias. Este factor es un parámetro promedio integrado basado en varios procesos erosivos e hidrológicos diferentes. Un Factor-K bajo (alrededor de 0.05 a 0.2) indica una resistencia alta a la erosividad y un Factor-K alto (alrededor 0.4 o más) indica un suelo muy erosivo. N-SPECT desarrolló una cuadricula GRID basada en el Factor-K para calculaciones RUSLE.
- **Factor-R –** El modelo N-SPECT requiere de una capa de SIG representando la precipitación pluvial y la erosión en el área de estudio. Esta es una variable que debe ser adquirida y/o desarrollada por el usuario. El Factor-R representa el promedio anual de los efectos erosivos que tienen las tormentas, y está basado en un índice de erosividad (EI); el EI se calcula a partir de la energía cinética de las tormentas y su intensidad máxima durante 30 minutos. Cuando este análisis se hizo, esta información no existía para la región del Arrecife Mesoamericano, de tal manera que se desarrolló un método alternativo para estimar el Factor-R. El método de desarrollo del Factor-R está descrito en la siguiente sección.
- **Factor-C –** Cada tipo de cobertura terrestre, por ejemplo bosques, praderas, o tierra apta para cultivos, tiene un factor asociado con la cobertura, o un Factor-C. Este factor es un grado de erosividad relacionado con cada tipo de cobertura terrestre (Ver Tabla 1). Las tierras cultivadas, con un Factor-C de .240 están calificadas como sesenta veces más erosivas que los bosques, que tiene un Factor-C de .004. Los Factores-C para la cobertura terrestre para este análisis en la región

[7] Ward, Andrew D., and Stanley W.Trimble. *Environmental Hydrology*, Segunda Ed. CRC Press, LLC. 2004.

MAR fueron adaptadas de los Factores-C provistos por NOAA en N-SPECT. El uso de promedios erosivos en derivados locales sería un valor interesante en el modelo.

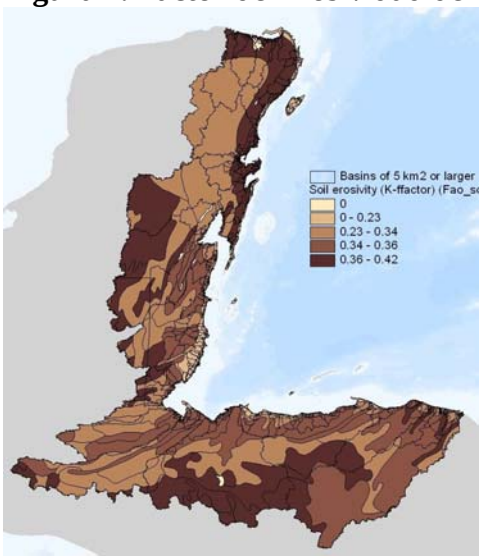
- **Factor-P** – RUSLE incluye un factor de prácticas de apoyo o Factor-P, que permite incluir la gran influencia de que ejercen algunas prácticas de conservación (como siembra de surcos y agricultura de terrazas) que controlan o mitigan la erosión. El factor y módulo de "Prácticas de apoyo" no se encuentran disponibles en la versión actual de N-SPECT. Por este motivo, el análisis se enfocó en los efectos de los cambios en cobertura terrestre en descarga de sedimentos contaminantes en la boca de los ríos adyacentes a la región del Arrecife Mesoamericano. Por otra parte, la información sobre prácticas de manejo específicas a través de la región del Arrecife Mesoamericano es limitada.

Tabla 1. Coeficientes del Factor-C en N-SPECT

Código	Categoría de cobertura terrestre	Factor de cobertura (*Cover-Factor*)
3	Baja intensidad desarrollada	0.030
4	Tierras cultivadas	0.240
5	Praderas	0.050
7	Bosques	0.004
9	Matorrales	0.014
10	Bosques de humedales	0.003
17	Terreno descubierto	0.700
18	Agua	0.000

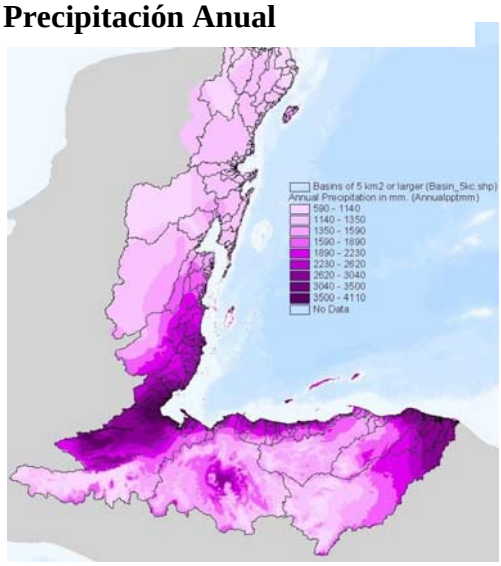
Fuente: USDA Manual de Agricultura No. 703

Figura 2. Factor de Erosividad del Suelo (Factor-K)



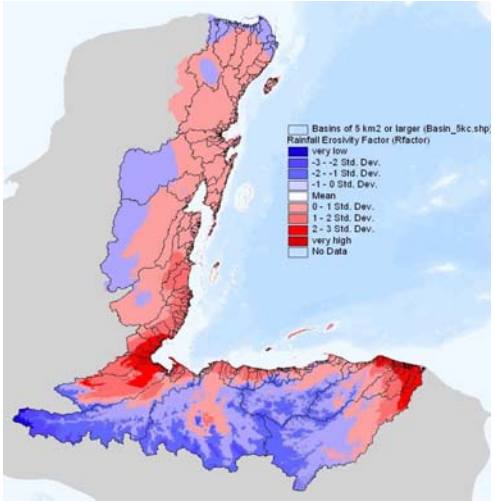
Erosividad Pluvial y Precipitación

Figura 3. Distribución de la Precipitación Anual



Escenario de precipitación: El modelo N-SPECT requiere de una serie de información sobre la precipitación en formato de retícula o celdas: la especificación del tipo de lluvia en la región (desde cuatro distribuciones sintéticas de 24-hr); y del promedio de "número de días de lluvia", el cual es complicado debido a las grandes áreas y el amplio rango de precipitación en la región. Todas las corridas anuales del modelo fueron conducidas usando como base una cuadricula del promedio de lluvia anual a largo plazo (el cual necesita ser especificado en pulgadas para el modelo N-SPECT), y el número de días lluviosos por año establecido en 40.[8] EL número de días lluviosos fue seleccionado basándose en la calibración del modelo de la región del Arrecife Mesoamericano por Will Heyman y Shin Kobara de la Universidad A&M de Texas.[9]

Figura 4. Erosividad Pluvial (Factor-R)



Factor-R: El Factor-R se derivó empíricamente basándose en la precipitación anual y la elevación del terreno utilizando una ecuación para la erosividad pluvial en Costa Rica. Los colaboradores del proyecto en la Universidad A&M de Texas validaron estadísticamente el factor-R resultante para la región del Arrecife Mesoamericano y encontraron que esta ecuación es un método estadístico válido para el estimar la erosividad de RUSLE para la región.[10] La ecuación utilizada para estimar el Factor-R se puede encontrar en las notas técnicas al final de este informe.

---

[8] La información sobre precipitación para el modelo N-SPECT debe estar en pulgadas. La variable "número promedio de tormentas en la localidad por año" en el modelo require de un solo número de los días lluviosos para toda el área de estudio. El modelo se usó seleccionando el "tipo de lluvia II", ya que representa de mejor manera las áreas con lluvias intensas.

[9] Ver documento en *Hydrologic Model Calibration* en el CD de datos *Watershed Analysis for the Mesoamerican Reef.*

[10] *Ibid*.

Vulnerabilidad del Terreno a la Erosión

El modelo N-SPECT evalúa la erosión y los contaminantes provenientes del terreno en una cobertura terrestre determinada. El proyecto también evalúa la vulnerabilidad innata del terreno a la erosión en base en la inclinación de la pendiente, la erosividad del suelo y la precipitación anual. Esta simplificación de la ecuación RUSLE utilizada en el modelo N-SPECT excluye a la cobertura terrestre, lo que permite identificar áreas vulnerables en donde tendría que evitarse la conversión a una cobertura terrestre con más erosividad; o en áreas que ya han sido convertidas, es necesario implementar mejores prácticas de manejo.

Ecuación 2: Vulnerabilidad de la tierra a la erosión

$$\textbf{Vulnerabilidad} = R * K * S^{\text{Exponente } 0.6}$$

R – Factor de descarga pluvial
K – Factor de erosividad del suelo
S – Inclinación (en grados)

Modelos de Escorrentía y Descarga de Contaminantes

El modelo N-SPECT evalúa la escorrentía basándose en las características del suelo, la cobertura terrestre, la topografía y la precipitación. Los cálculos de escorrentía están basados en curvas desarrolladas por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos; estas curvas reflejan la permeabilidad general de un tipo de suelo determinado.[11] Las curvas también están asociadas con la clasificación del grupo hidrológico del suelo (A, B, C ó D), el cual es una medida del potencial del drenaje, o del grado de filtración que puede tener el suelo. Los suelos en el grupo A poseen buen drenaje, mientras que suelos en el Grupo D poseen un drenaje pobre y tienen tendencia a inundarse. Los grupos hidrológicos son atributos contenidos en la base de datos de suelos del grupo SOTERLAC. Las curvas de permeabilidad dependen también en los tipos de cobertura terrestre. El modelo N-SPECT selecciona automáticamente las curvas para calcular la escorrentía basándose en las combinaciones del grupo de suelo hidrológico y los grupos de cobertura terrestre en cada celda de la retícula. Las curvas usadas se encuentran en la Tabla 2.

[11] Ver *Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55, USDA-Natural Resource Conservation Service (NRCS)* en el CD de datos del *Análisis de Cuencas Hidrológicas en el Arrecife Mesoamericano.*

Tabla 2. Coeficiente de Curvas de Descarga Usados en el Modelo N-SPECT por Tipo de Cobertura Terrestre y Grupo de Suelo Hidrológico

Código	Categoría de cobertura terrestre	CN-A	CN-B	CN-C	CN-D
3	Baja intensidad desarrollada	0.61	0.75	0.83	0.87
4	Tierras cultivadas	0.67	0.78	0.85	0.89
5	Praderas	0.39	0.61	0.74	0.80
7	Bosques	0.30	0.55	0.70	0.77
9	Matorrales	0.30	0.48	0.65	0.73
10	Bosques de humedales	0.00	0.00	0.00	0.00
17	Tierra descubierta	0.77	0.86	0.91	0.94
18	Agua	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: *Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55, USDA-NRCS*

N-SPECT evalúa la cantidad de contaminantes basados en escorrentía, cobertura terrestre, y topografía. Los coeficientes que representan las contribuciones de cada clase de cobertura terrestre a la descarga de contaminantes (Nitrógeno, Fósforo y total de sólidos suspendidos) son capturados en un banco de datos de cobertura terrestre como una medida aproximada de la cantidad de contaminantes. Estos coeficientes reflejan el promedio de concentración de contaminantes en cada tipo de cobertura terrestre, y provienen de estudios e investigaciones publicadas por NOAA y están incluidos en el modelo N-SPECT. Esto quiere decir que el modelo puede ser más preciso utilizando estos coeficientes de contaminantes derivados locales; sin embargo, esta información no está disponible para la región del Arrecife Mesoamericano. El proceso que se siguió para derivar los coeficientes está descrito en la *Guía Técnica* del modelo N-SPECT en el CD *Análisis de Cuencas Hidrológicas en el Arrecife Mesoamericano*.

Tabla 3. Coeficientes de Contaminantes: Fósforo, Nitrógeno, y Total de Sólidos Suspendidos (TSS)

Clase		Coeficientes		
Valor	Nombre	Fósforo	Nitrógeno	TSS
3	Baja intensidad desarrollada	0.18	1.77	19.1
4	Tierras cultivadas	0.42	2.68	55.3
5	Praderas	0.48	2.48	55.3
7	Bosque	0.05	1.25	11.1
9	Matorrales	0.05	1.25	11.1
10	Bosques de humedales	0.20	1.10	19.0
17	Tierra descubierta	0.12	0.97	70.0
18	Agua	0.00	0.00	0.0

Fuente: *Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55, USDA-NRCS*

Modelo de Circulación

La universidad de Miami adaptó un modelo de circulación para examinar el transporte de materia suspendida a lo largo de la región del Arrecife Mesoamericano (materia suspendida incluye sedimentos suspendidos, detritus orgánico y nutrientes disueltos). El Sistema Regional del Modelo Marino (*Regional Ocean Modeling System* -ROMS) proporciona modelos espaciales y temporales de la circulación oceánica y el transporte—a través de corrientes—de la descarga de los ríos a lo largo de la región del Arrecife Mesoamericano. El modelo incorpora varios ambientes marinos como son los arrecifes coralinos de barrera, las lagunas de arrecifes, las aguas adyacentes al océano, así como la topografía de fondo (batimetría) a una resolución de 1 kilómetro. La resolución horizontal de la simulación es de 2 kilómetros (tamaño de la celda en la retícula).[12] El modelo incluye variables del estado del océano (temperatura, salinidad, corrientes y mareas) y los flujos de la superficie (vientos, lluvia, flujos en la radiación solar y de calor) para la simulación de las aguas marinas y costeras. Esta información fue tomada de la climatología oceánica y atmosférica de Levitus,[13] que proporciona promedios mensuales a largo plazo a lo largo de un año. La descarga mensual de los ríos y el transporte de sedimento (usado como un indicador del transporte de materia suspendida) fueron incorportados a partir del modelo N-SPECT.[14] En el modelo ROMS, los ríos se consideraron como puntos de origen. El rastreo de la dispersión de la materia suspendida es calculado en ROMS como transporte hidrodinámico pasivo.[15]

A partir de estos métodos, el modelo produce las condiciones promedio a largo plazo (climatología) de la circulación y transporte de la materia suspendida en la región del Arrecife Mesoamericano. Para entender la respuesta marina al transporte de sedimentos dependiendo de las diferentes coberturas terrestres y tormentas, se hicieron cuatro simulaciones numéricas. La primera simulación se hizo con información de condiciones "existentes" (cubierta terrestre durante 2003/4 y precipitación pluvial promedio mensual). Se hicieron simulaciones en el modelo por dos años para encontrar una representación válida del equilbrio de la acumulación de la descarga de sedimento que es transportado por los ríos. El modelo alcanzó el equilibrio en materia suspendida durante el invierno del segundo año. A partir de ahí, se hicieron simulaciones para capturar la descarga y transporte de sedimento asociado con a) un escenario de "condiciones actuales", b) un escenario de "sostenibilidad primero", c) el Huracán Keith, y d) el Huracán Mitch.

---

[12] La resolución vertical del modelo ROMS varía con la distancia de la orilla.

[13] Para más información sobre la climatología marina y atmosférica de Levitus, consulte http://ingrid.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.LEVITUS94/ (climatología marina) y http://icoads.noaa.gov/status.html (climatología atmosférica).

[14] Los valores estimados del transporte de sedimento (erosión total dentro de la cuenca hidrológica) es información de entrada en el modelo ROMS. Es posible que el transporte de sedimento este sobreestimado, sin embargo, estos valores proporcionan una indicación relativa de los patrones estacionales y la magnitud del transporte de sedimento. Dentro del modelo ROMS, el sedimento se consideró un indicador de material suspendida; Materia suspendida incluye sedimentos suspendidos, detritus orgánico y nutrients disueltos.

[15] El "buscador de transporte hidrodinámico pasivo" del modelo ROMS usa un esquema de "advección-difusión" que captura el transporte por la corriente (advección) y la dispersion debido a la turbulencia (difusión). Con los resultados del modelo ROMS, las diferentes fuentes de material suspendido (desembocadura de los ríos) y el destino final (arrecifes) está conectado a través de una matriz.

Calibración y Validación del Modelo

Toda modelación compleja y de múltiples escalas debe ser validada en cada paso del análisis. Este análisis es útil para integrar una gran variedad de datos, y adaptar herramientas de modelaje para crear un análisis regional e innovativo. En nuestro caso, en la medida de lo posible se utilizó información publicada y/o indicadores aproximados de teledetección para calibrar y validad los resultados del modelo; la información de entrada del análisis se describe más adelante. Un aspecto importante del proyecto, sin embargo, es el de proporcionar todas estas herramientas de modelaje a los colaboradores en la región del Arrecife Mesoamericano, de manera que ellos puedan aplicar estas herramientas a una resolución más alta, y usen información local para calibrar y validar los resultados del modelo. Los resultados regionales de este análisis deben considerarse preliminares e indicativos de patrones generales de erosión y transporte y descarga de sedimento y nutrientes a lo largo de la región.

1- **Evaluación de la información de entrada en el modelo**. Este análisis utilizó la mejor información disponible a nivel regional. Toda la información de entrada (elevación, ríos, precipitación, suelos, y cobertura terrestre) fué evaluada con relación a la precisión espacial y la consistencia de sus atributos. No se identificó ninguna limitación en la información de entrada que afectara significativamente los resultados del modelo.[16]

2- **Calibración de los Parámetros de Transporte y Precipitación.** Los estimados de descarga y erosión dependen en gran medida de dos parámetros- el factor de erosividad de la precipitación (Factor-R), y el número de días lluviosos por año. Colaboradores del proyecto en la Universidad A&M de Texas pusieron a prueba los parámetros de entrada del modelo (Factor-R y el número de días lluviosos por año) para calibrar los componentes del modelo que tienen que ver con el transporte y la descarga de sedimento. Se encontró que los parámetros examinados tuvieron una buena corelación con las predicciones de descarga provenientes de un modelo de balance de agua, y con estimaciones de erosividad.[17] Esta calibración está descrita en mayor detalle en el documento "Calibración del Modelo Hidrológico" (*Hydrological Model Callibration*) en el CD *Análisis de las Cuencas Hidrológicas del Arrecife Mesoamericano*.

3- **Validación de descarga de los Ríos.** Los valores de descarga de los ríos a partir del modelo N-SPECT fueron comparados con los valores estimados usando un

[16] La información del SRTM y la información sobre elevación derivada de radar tienen inexactitudes intrínsecas debido a la detección de estructuras hechas por el hombre como son edificios. Estas inexactitudes afectan hasta cierto grado las estimaciones de las pendientes pero, en general, no afectan significativamente los resultados del modelo.

[17] La Ecuación del Balance de Agua fué desarrollada por Thattai, Deeptha, Björn Kjerfve, W.D. Heyman, 2003. Hydrometereology and variability of water discharge and sediment load in the Inner Gulf of Honduras. Western Caribbean. *Journal of Hydrometeorology* 4:985-995. Los valores estimados de erosividad provienen de Mikhailova, E.A., R.B. Bryant, S.J. Schwager, and S.D. Smith. 1997. Predicting rainfall erosivity in Honduras. *Soil Science Society of America Journal.* 273-279.

modelo de balance de agua[18] que ha sido comparado con información real de descargas de seis cuencas hidrológicas en el Golfo de Honduras. Los valores estimados de descarga tuvieron patrones comparables y estuvieron, en general, dentro del veinticinco por ciento de los valores estimados que han sido publicados por otros.

4- **Tasas Locales de Erosión y Escorrentia de Contaminantes.** El modelo N-SPECT estima las fuentes de erosión dependiendo de la aplicación de RUSLE. Por otro lado, los valores estimados de la descarga de de contaminantes dependen de la aplicación de curvas de descarga desarrolladas por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (*US Agriculture Department* – USDA). Ambas técnicas son ampliamente usadas. En el futuro, las ecuaciones utilizadas en estas técnicas podrían ser más exactas si se usan coeficientes derivados localmente para la erosión y contaminantes, sin embargo, esta información no existe para la región del Arrecife Mesoamericano. Aunque sólo existe información local limitada para la validación de nuestros valores estimados, en general, los valores obtenidos la erosión, y de descarga de Nitrógeno y Fósforo (fuentes) están dentro de los límites razonables de estimaciones hechas para otras áreas.[19]

5- **Descarga de Contaminantes en la Desembocadura de los Ríos.** Una limitada cantidad de información está disponible para validar los resultados del modelo. Se compararon los resultados de la descarga de los ríos con información de campo del Estudio Científico sobre la Interconexión entre las Cuencas Hidrológicas y los Arrecifes (*Watershed Reef Interconnectivity Scientific Study* – WRIScS)[20] y el modelaje conducido por Thattai et al.[21] Los valores estimados de descarga y producción de sedimento (por unidad de área) fueron comparados con valores estimados para cuencas de tamaño similar y con gradientes similares en varias partes del mundo.[22] Los valores estimados para la descarga de sedimento derivados del modelo N-SPECT fueron más altos de lo esperado en las cuencas hidrológicas más grandes de la region. Una limitación clave del modelo N-SPECT es que no cuenta adecuadamente la atenuación (pérdida o re-depósito) del sedimento y los nutrientes dentro de la cuenca hidrológica en la medida que se

---

[18] Thattai, Deeptha, Björn, Kjerfve, W.D. Heyman, 2003. Hydrometereology and variability of water discharge and sediment load in the Inner Gulf of Honduras, Western Caribbean. *Journal of Hydrometereology* 4:985-995.

[19] El rango razonable de los valores (bajo, típico y alto) se establecieron en base a la erosión (aplicando RUSLE), descarga de Nitrógeno (aplicando la ecuación de balance de Nitrógeno), y descarga de Fósforo (juntando resultados de RUSLE con los valores estimados de la concentración de Fósforo en el suelo).

[20] Nunny, R., M. Santana, P. Stone, D. Tillet, and P.D. Walling. 2001. *An Investigation of the Impact of Reef Environments of Changing Land Use in the Stann Creek District in Belize*. Technical Report Module 3. The Watershed Reef Interconnectivity Study (WRIScS) 1997-2000.

[21] Thattai, Deeptha, Björn Kjerfve, W.D. Heyman, 2003. Hydrometereology and variability of water discharge and sediment load in the Inner Gulf of Honduras. Western Caribbean. *Journal of Hydrometeorology* 4:985-995.

[22] J.D. Milliman and J.P.M. Stvitski. 1992. Geomorphic/Tectonic Control of Sediment Discharge to the Ocean: The Importance of Small Mountainous Rivers. In *The Journal of Geology*, 1992. volume 100, p. 525-544.

dirigen a la desembocadura del río.[23] Es posible que los valores del modelo sobreestimen más los sedimentos que los nutrients puesto que los sedimentos más grandes son más afectados por la redisposición del Nitrógeno (en solución) ó el Fósforo (pegado a pequeñas partículas de suelo). Los resultados del modelo N-SPECT, por lo tanto, indican el parámetro más alto, o el escenario para el peor de los casos de la descarga de sedimentos. La producción (por unidad de área) de Nitrógeno y Fósforo están dentro de los límites razonables dados los parámetros esperados de descarga descritos arriba. Los valores estimados de producción y descarga de sedimento por cuenca hidrológica parecen ser altos, en particular en el caso de la cuenca hidrológica más grande. Es posible que en las cuencas hidrológicas más grandes la descarga de sedimento este sobre estimado por un factor de entre dos y cuatro. Por lo tanto, los valores estimados de descarga de sedimento y nutrientes en la desembocadura de los ríos indican los patrones relativos y el orden de magnitud, pero no deben ser usados como valores exactos y/o absolutos.

6- **Transporte de Sedimentos al Arrecife.** Los resultados del modelo ROMS con relación a la extensión de materia suspendida que alcanza el Arrecife Mesoamericano están siendo comparados con los mapas de Materia Detrital de Color (*Colored Detrital Matter* – CDM)[24] derivados del sensor de teledetección *Sea-viewing Wide Field-of-view* (SeaWiFS). Se utilizó el Algoritmo de Optimización de Espectro (*Specral Optimization Algorithm* – SOA)[25] para procesar la información SeaWiFS en las aguas del Caribe que son ópticamente complejas.[26] El producto resultante, $a_{\mathrm{CDM}}(443)$ (llamado CDM) es un coeficiente de absorción que sirve como una aproximación del transporte de materia suspendida. La Figura 5 muestra la diferencia entre la descarga mensual de los ríos y el CDM promedio en las imágenes de SeaWiFS que se procesaron.

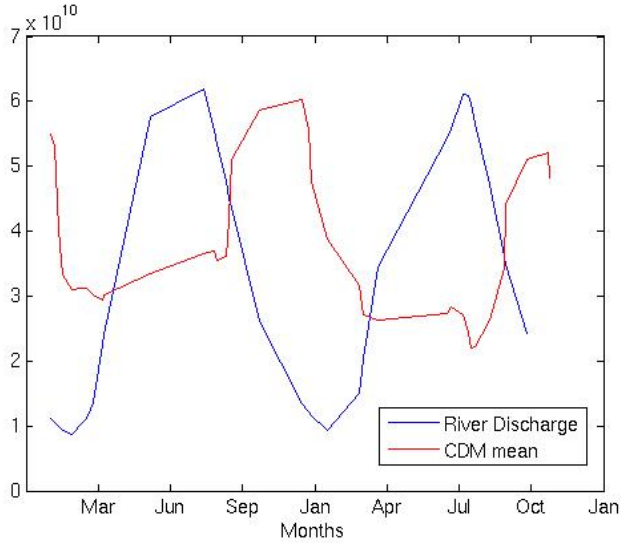
[23] El modelo N-SPECT aplica una proporción de descarga de sedimento a cada celda individual de la retícula para ajustar la carga de sedimento; sin embargo, esto no sucede a lo largo de toda la cuenca puesto que los sedimentos pueden ser re-depositados en la medida que el sedimento se dirige a la desembocadura del río.

[24] CDM incluye carbono orgánico disuelto proveniente del suelo y plantas; este carbono también se conoce como Materia Orgánica Disuelta de Color (*Colored Dissolved Organic Matter* – CDOM), más particulas de detritus (material orgánica muerta).

[25] Kuchinke, C.P., H.R. Gordon, L.W. Harding Jr., and K.J. Voss, A compled oceanic and atmospheric spectral optimization altorithm for ocean color imagery in Case 2 waters: a validation for Chesapeake Bay. PROPUESTO PARA PUBLICACIÓN. *Remote Sensing of Environment* (2006).

[26] Aguas ópticamente complejas continenen una multitud de componentes como material orgánica disuelta de color y fitoplancton.

Figura 5. Relación Temporal entre los Valores Estimados de Descarga de Ríos Usando N-SPECT y el Coeficiente de Absorción de Materia Detrital de Color (CDM) , derivado de Imágenes de Satélite del Norte de Honduras



Fuente: Universidad de Miami, 2006.

La clasificación de CDM a partir de imágenes de satélite de SeaWiFS se usa para evaluar dos aspectos de los resultados del modelo ROMS de circulación marina. (1) La variabilidad estacional de los patrones de dispersión de plumas de la materia suspendida, y (2) la variabilidad estacional de la concentración total de la materia suspendida. Las plumas de materia suspendida del modelo de simulación ROMS se compararon con las clasificaciones de CDM a lo largo de transectos perpendiculares a la costa.

Los patrones estacionales son similares entre las plumas de materia suspendida generadas a partir de ROMS y las tendencias estacionales observadas en la información de SeaWiFS, aunque existe considerable variabilidad anual en esta última. En general, el modelo concuerda muy bien con las observaciones en relación con el tiempo y la localidad. Sin embargo, existen algunas discrepancias en relación con la estructura del gradiente de la pluma. Si se compara la posición más extrema del promedio de la pluma CDMestimada a partir de SeaWiFS, con las plumas de materia suspendida estimadas por le modelo, los resultados de CDM varían estacionalmente entre 10 y 40 kilómetros, mientras que las plumas modeladas con ROMS son en su mayoría de casi 40 kilómetros de ancho. Es posible que estas diferencias se deban a al coeficiente de difusión usado en el modelo ROMS, el cual es muy pequeño. La validación del modelo de circulación está descrita con más detalles en *"Dynamics of Buoyant Matter in the MAR Region"* en el CD de datos del *Análisis de las Cuencas Hidrológicas en el Arrecife Mesoamericano*."

Limitaciones del Análisis

Cualquier modelo con múltiples etapas tendrá siempre inexactitudes, y es vital que los usuarios estén conscientes de las limitaciones del modelo y usen los resultados apropiadamente.

Limitaciones del Modelo Hidrológico

Una limitación clave del modelo N-SPECT es que el modelo no incorpora adecuadamente la disminución de nutrientes (pérdida o redisposición) en la cuenca hidrológica durante el trayecto hacia la desembocadura del río. Como resultado, los valores estimados de la descarga de sedimento y nutrientes en la desembocadura del río son exagerados. Los valores absolutos no son precisos, pero sí sirven como un indicador general de la magnitud y los patrones del descarga de sedimento y nutrientes en la región. Aunque no son exactos, los valores estimados son útiles para examinar los patrones relativos y las implicaciones de los diferentes escenarios de políticas ya que las estimaciones del porcentaje de cambio son válidas.

Una segunda limitación del modelaje es el énfasis en el papel que juega el cambio de cobertura terrestre sin considerar el efecto específico de las prácticas de manejo de uso de suelo. Para la región del Arrecife Mesoamericano, solo existe información sobre el tipo de cobertura terrestre y no existe información sobre las intervenciones específicas de manejo. El módulo de prácticas de manejo del modelo N-SPECT aún no se ha implementado. Además, no existe información detallada sobre la reducción en la erosión y descarga de nutrientes asociada con cada una de las prácticas de manejo agrícola. Una vez que exista esta información, sería posible evaluar los beneficios en el modelo tratando cada intervención de manejo para distintos tipos de cobertura terrestre (Factor-C) y coeficientes de contaminación para distintas categorías (por ejemplo cultivos de cítricos con control de erosión). Esta sería una extensión valiosa para éste análisis.

Otra limitación es que el modelo no considera las represas de agua, las cuales atrapan sedimento. Técnicamente, es posible desarrollar una función para incorporar las represas dado que existe información sobre tasas de retención de sedimento en las mismas. Esta aplicación podría ser importante para considerar en aplicaciones locales del modelo N-SPECT.

Limitaciones del Modelo de Circulación

En relación a las limitaciones del modelaje en el Arrecife Mesoamericano, la primera es que el resultado se da en relación a las condiciones promedio a largo plazo (climatología). Es decir, la circulación es representativa de las condiciones más comunes que se pueden encontrar cada año si todos los eventos climatológicos extremos o inusuales fueran removidos. Los resultados del modelo reflejan condiciones promedio a largo plazo, por lo tanto, hacer comparaciones diarias entre el modelo de circulación y las observaciones actuales es irrelevante. Sin embargo, si se hacen comparaciones con observaciones durante el mismo mes durante varios años es posible derivar patrones comunes con los resultados del modelo.

La segunda limitación es la dispersión de las imágenes del CDM debido a la nubosidad en las imágenes de SeaWiFS. Sólo unas pocas imágenes de satélite al año son de buena calidad en la región del Arrecife Mesoamericano, y para la mayoría de los años no existen imágenes claras durante los meses de verano. Sin embargo, existen suficientes observaciones para recuperar las tendencias globales de las concentraciones en el CDM para un periodo de un año, como se puede apreciar en la Figura 5.

La tercera limitación es que no existe una relación directa entre el coeficiente de absorción del CDM y la concentración del CDM. Se necesita tener mediciones directas de muestras de agua, que no están disponibles todavía, para obtener tal información. Por lo tanto, solamente un modelo de circulación puede ser usado para estimar la materia suspendida que alcanza a los arrecifes.

Finalmente, en el modelo numérico la materia suspendida no se deposita ni se acumula, sino que es transportada constantemente hasta que sale del área. Sin embargo, es posible estimar la cantidad de materia suspendida que se acumularía basándose en mediciones sobre la cantidad de materia que pasa por una localidad determinada. El modelo y las observaciones reflejan la extensión máxima de la pluma y cuál es su comportamiento con el tiempo.

Resultados del Análisis

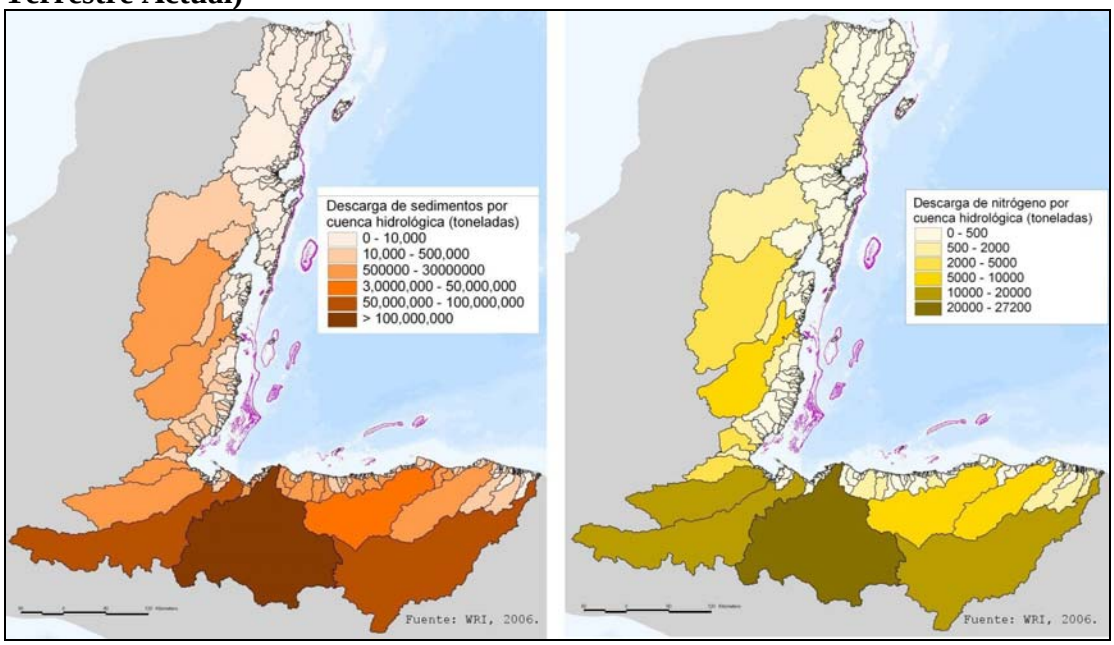
La presentación de los resultados se enfoca primero en la descarga de sedimentos y contaminantes al nivel de las cuencas para más de 400 desembocaduras de ríos a través de la región del Arrecife Mesoamericano. Inicialmente se examinó la descarga de sedimentos y contaminantes tomando en cuenta la cobertura terrestre actual (2003/04); subsecuentemente, estos datos se compararon con resultados derivados usando diferentes tipos de cobertura terrestre (cobertura terrestre “natural”, y los tres escenarios de cobertura terrestre para el añ0 2025). A continuación se examinó el transporte de sedimentos en las aguas costeras a través de la región. Finalmente, se hizo un análisis de la vulnerabilidad terrestre a la erosión, y una evaluación del orígen local del sedimento y la polución.

1) Descarga de Sedimentos y Contaminantes en Base a la Cobertura Terrestre Actual (2003/04)

El modelo N-SPECT fue utilizado para evaluar la acumulación de sedimentos de Nitrógeno (N), Fósforo (P), y el Total de Sólidos Suspendidos (*Total Suspended Solids* - TSS) en más de 400 cuencas hidrológicas de la región del Arrecife Mesoamericano. Los mapas en la Figura 6 muestran la acumulación relativa de sedimentos y Nitrógeno en la desembocadura de los ríos a través de la región. Se encontró que la cuenca hidrológica del Río Ulúa en Honduras es la más grande en cuanto a la contribución de sedimentos, Nitrógeno, Fósforo, y TSS. Otros ríos identificados como grandes depositarios de sedimentos y nutrientes son el Río Patuca (en Honduras), el Río Motagua (en Guatemala

y Honduras), el Río Aguan (en Honduras), el Río Dulce (en Guatemala), el Río Belice (en Belice), y el Río Tinto o Negro (en Honduras). Los nombres de las cuencas hidrológicas se encuentran en el la Figura A en la sección de Hallazgos Clave.

Figura 6. Descarga de Sedimentos y Nitrógeno por Cuenca Hidrológica (Cobertura Terrestre Actual)



2) Comparación de Resultados entre la Cobertura Terrestre Actual (2003/04) y la Cobertura Terrestre Hipotética Natural

Para evaluar los impactos de la alteración del paisaje por actividad humana sobre la descarga de sedimento y contaminantes en la desembocadura de los ríos a lo largo de la región del Arrecife Mesoamericano, el modelo N-SPECT se corrió utilizando dos escenarios de cobertura terrestre, a saber: la cobertura terrestre actual (2003/04) y una cobertura terrestre natural hipotética (sin alteraciones). La tabla 4 presenta la comparación de la distribución de la cobertura terrestre para dichos escenarios. La descarga de sedimentos, y contaminantes (Nitrógeno, Fósforo y TSS) para más de 400 desembocaduras de ríos está sintetizada en la Tabla 5. Las descargas asociadas a la alteración del paisaje por actividades humanas incrementó casi el doble. El modelo N-SPECT indica que la descarga de sedimentos aumentaría por un factor de 20, mientras que el Nitrógeno aumentaría por un factor de 3, Fósforo por factor de 7, y la TSS por un factor de 5.

Tabla 4. Comparación de Cobertura Terrestre Natural y Actual (Porcentaje en Cada Tipo de Cobertura)

Categoría del terreno	Natural	Actual
Desarrollado/Urbano	0.0%	0.3%
Tierras cultivadas	0.0%	32.4%
Praderas y sabanas	1.8%	1.6%
Bosques	82.4%	50.6%
Matorrales	8.3%	10.4%
Pantanos	6.0%	3.2%
Tierra al descubierto / playas / desconocidas	0.4%	0.3%
Agua	1.1%	1.2%

Fuente: ICRAN MAR, 2006

Tabla 5. Comparación de los Resultados Regionales Usando Modelos Anuales en Cobertura Terrestre Actual y Cobertura Terrestre Natural

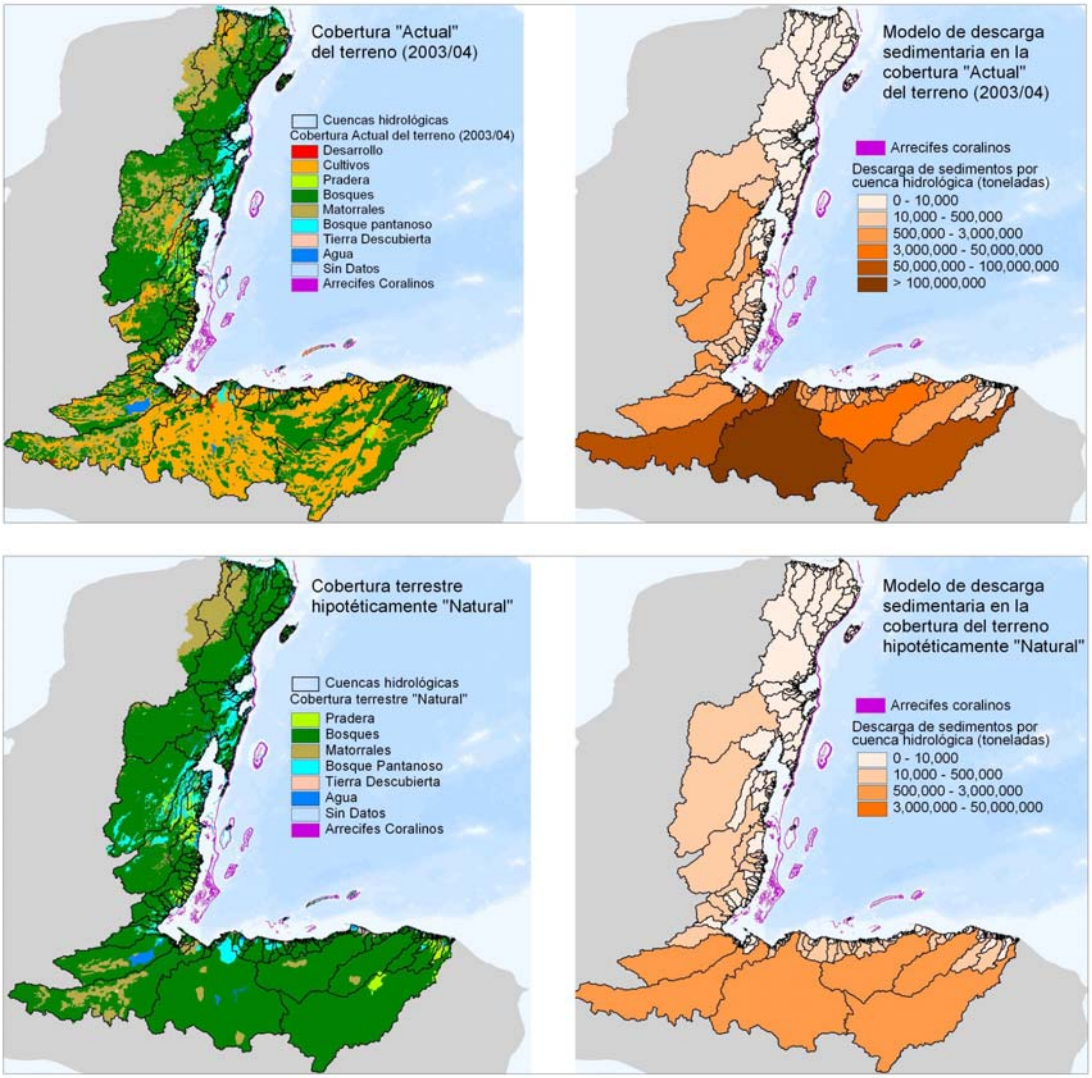
Escenario	Descarga (x109 m3)	Sedimentos (x109 Tm)	Nitrógeno (x109 Tm)	Fósforo (x109 Tm)	TSS (x109 m)
Actual (2003/2004)	**60**	**370**	**130**	**17**	**2,400**
Natural (sin desarrollo)	**34**	**17**	**45**	**2**	**470**
Promedio entre Actual / Natural	**2X**	**22X**	**3X**	**7X**	**5X**

Fuente: WRI, 2006

Nota: la descarga de sedimento, N, P y TSS representa estimados en los límites superiores para la región; la pérdida de sedimentos y nutrientes debido la redisposición no estan considerados. Los valores reflejan la erosión general y la descarga de contaminantes dentro de la región y constituyen un indicador general de la magnitud dek la descarga de sedimento y nutrientes pero no deben considerarse como valores absolutos. Sin embargo, la relación relativa entre los escenarios es válida.

El mapa de la Figura 7 presenta resultados en cobertura terrestre y la descarga de sedimentos para ambas cobertura terrestres: actual y natural.

Figura 7. Descarga de Sedimento Modelada a Partir de Cobertura Terrestre Actual y Natural



Fuente: WRI, 2006.

3) Comparación entre la Cobertura Terrestre Actual y los tres Escenarios de Desarrollo para el Año 2025

Los escenarios de los cambios de la cobertura terrestre a través de la región del Arrecife Mesoamericano en el año 2025 se utilizaron para evaluar los impactos de dichos cambios en la descarga de sedimentos y contaminantes. La Tabla 6 y la Figura 8 reflejan la distribución de la cobertura terrestre en los mismos escenarios. El modelo N-SPECT se aplicó a estos tres escenarios y los resultados se presentan en la Tabla 7. El modelo N-SPECT indica que el escenario de “Mercados Primero” resultaría en un aumento del 13 por ciento en descargas de sedimentos comparadas con el escenario de cobertura terrestre actual; por otro lado, la descarga de sedimentos sólo aumentaría un cinco por ciento bajo el escenario de “Políticas Primero”, y disminuiría un cinco por ciento bajo el escenario

“Sustentabilidad Primero”. La descarga de nutrientes y de TSS también aumentarían en un porcentaje alto bajo el escenario de “Mercado Primero” (se espera un incremento entre 8-11 por ciento de aumento en descarga de Nitrógeno, Fósforo, y TSS). En el otro extremo se encontró que el escenario de “Sustentabilidad primero” podría resultar en una disminución de cuatro ó cinco por ciento en nutrientes y TSS en base, solamente, a los cambios en la cobertura terrestre. Se puede alcanzar reducciones de descarga de sedimento y nutrientes adicionales a través de la implementación de mejores prácticas de manejo agrícola, las cuales no fueron consideradas en éstos escenarios.

Tabla 6. Comparación entre Escenarios de Cobertura Terrestre (Porcentaje de Cada Tipo de Cobertura)

Tipo de Cobertura de Terreno	Actual	Mercado Primero	Políticas Primero	Sustentabilidad Primero
Desarrollo/Urbano	0.3%	0.6%	0.6%	0.5%
Cultivado (agricultura)	32.4%	36.7%	34.2%	31.3%
Sabana/ Pastizal	1.6%	1.5%	1.5%	1.7%
Bosque	50.6%	45.8%	48.9%	49.8%
Arbustivo	10.4%	10.6%	9.9%	11.9%
Terrenos Inundados / Manglares	3.2%	3.1%	3.2%	3.1%
Desnudo / Playa / Desconocido	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%
Agua	1.2%	1.4%	1.4%	1.4%

Fuente: ICRAN MAR, 2006

Figura 8. Distribución de Cobertura Terrestre dentro de Cada Escenario

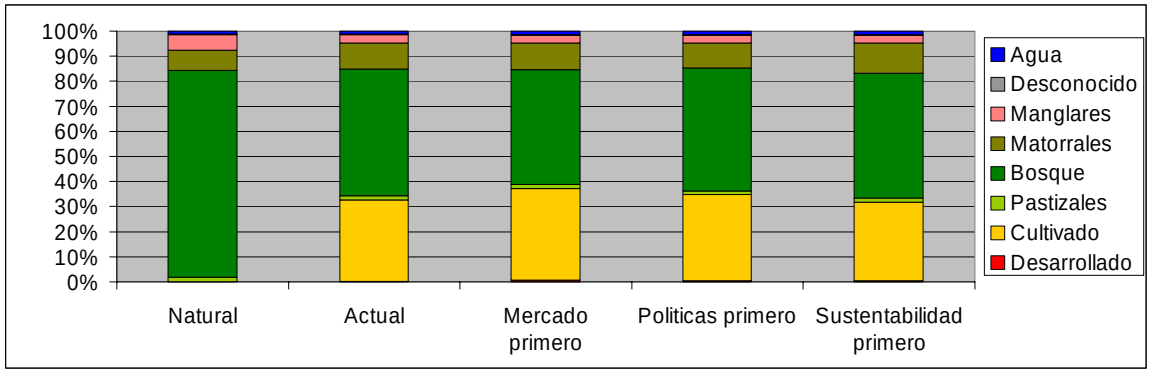


Tabla 7. Comparación de Resultados Regionales entre los Modelos Anuales de Cobertura Terrestre Actual y los Tres Escenarios para 2025

Escenario	Descarga ($x10^9$ m^3)	Sedimentos ($x10^9$ Tm)	Nitrógeno ($x10^9$ Tm)	Fósforo ($x10^9$ Tm)	TSS ($x10^9$ Tm)
Actual (2003/2004)	60	370	130	17	2,400
Mercados Primero	63	420	149	19	2,630
Porcentaje de Cambio	5%	13%	8%	11%	10%
Políticas Primero	61	390	135	18	2,480
Porcentaje de Cambio	2%	5%	3%	4%	4%
Sustentabilidad Primero	59	355	125	16	2,300
Porcentaje de Cambio	-2%	-5%	-4%	-5%	-4%

Fuente: WRI, 2006

Nota: la descarga de sedimento, N, P y TSS representa valores estimaciones para los límites superiores para la región; la pérdida de sedimentos y nutrientes debido al re-depósito no estan considerados. Los valores reflejan la erosión general y la descarga de contaminantes dentro de la región y constituyen un indicador general de la magnitud de la descarga de sedimento y nutrientes pero no deben considerarse como valores absolutos. Sin embargo, la relación relativa entre los escenarios es válida.

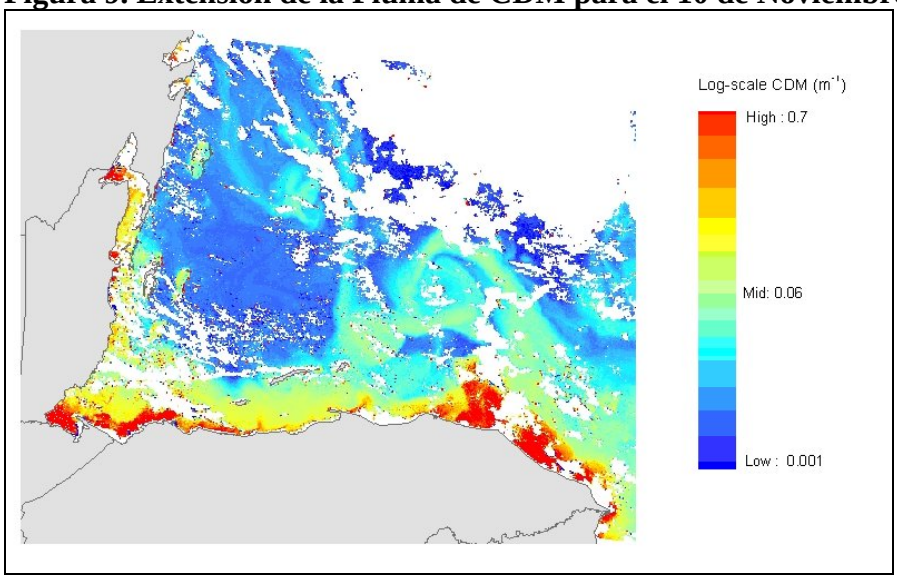
4) Eventos Extremos

Usando N-SPECT, WRI modeló la descarga, erosión y transporte de sedimentos durante episodios extremos de lluvia, como son los huracanes en la región del Arrecife Mesoamericano. Se implementó un análisis del Huracán Keith en Belice, cubriendo un área que se extiende sobre más de 90 cuencas hidrológicas.[27] Durante los cinco días que duró la tormenta (29 de Septiembre y el 3 de Octubre) se estimó que la descarga de las 90 cuencas hidrológicas fue aproximadamente 30 por ciento de la descarga normal anual (modelada), mientras que el total de sedimento transportado fue de casi 50 por ciento de la descarga normal anual. También se evaluó el impacto de la precipitación durante el Huracán Mitch (27-30 de Octubre de 1998) en más de 100 cuencas hidrológicas en Honduras.[28] Se estimó que la descarga ocasionada por este evento fue de casi un tercio del total anual normal (modelado), y el volumen estimado de sedimento descargado fue de casi dos tercios del promedio que el modelo predijo para ese año. Este análisis resalta el impacto significativo que tienen eventos de tormenta grandes sobre el transporte y descarga de sedimento en la zona costera. La Figura 9 muestra la extensión de la pluma de CDM el 10 de Noviembre de 1998, casi dos semanas después del Huracán Mitch.

[27] El Departamento de Metereología de Belice proporcionó la información sobre la precipitación durante el Huracán Keith.

[28] El *US Geological Survey* proporcionó información sobre la precipitación durante el Huracán Mitch.

Figura 9. Extensión de la Pluma de CDM para el 10 de Noviembre de 1998

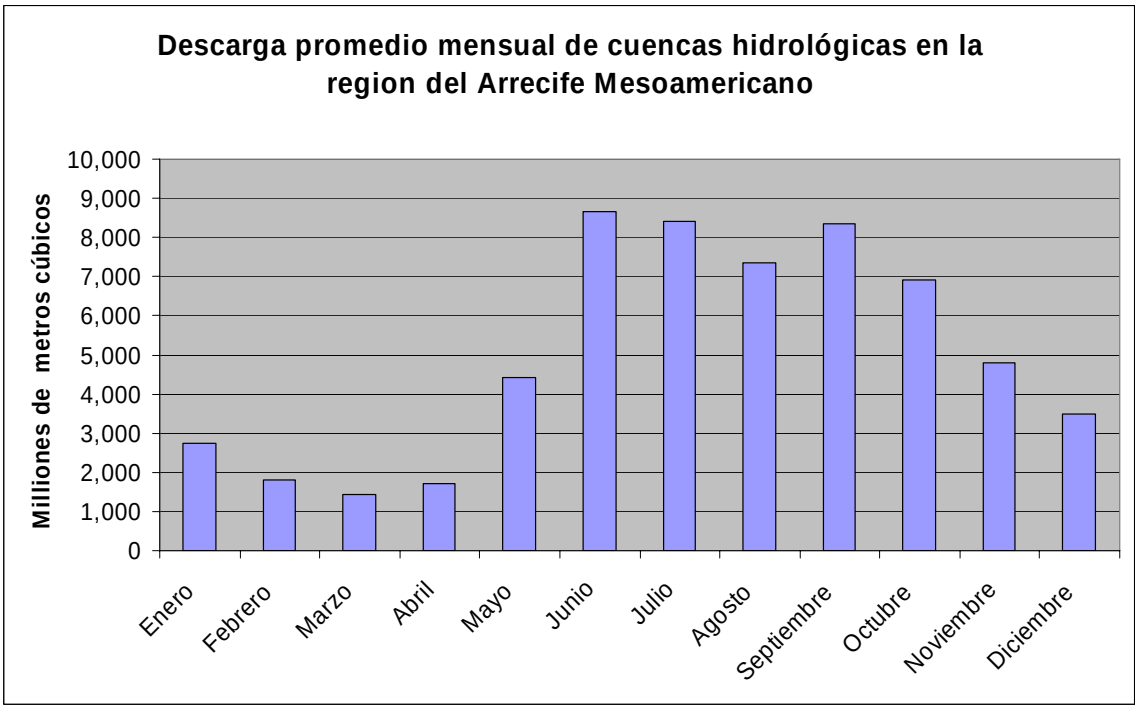


Extensión de la pluma de la Materia detrital de color (CDM) en base a imagines de SeaWiFS por Christopher Kuchinke, Universidad de Maryland. Nota: El Algoritmo de Optimización Espectral (SOA) reemplaza por completo la corrección atmosférica "estándard" de SeaWiFS y el algoritmo bio-óptico.

5) Transporte de Materia Suspendida en el Arrecife Mesoamericano

WRI aplicó el model N-SPECT a valores mensuales para estimar el promedio mensual de la descarga de los ríos y la descarga de sedimentos para los escenarios de cobertura terrestre "actual" y de "sustentabilidad primero." Los resultados se introdujeron en el modelo de circulación marina (ROMS) de la Universidad de Miami para predecir el transporte de la material suspendida a lo largo del Arrecife Mesoamericano. Los resultados del modelo ROMS reflejan la variabilidad estacional de la extensión y la concentración de la pluma de materia suspendida. Las animaciones de la circulación de la circulación de la material suspendida annual están disponibles en el CD *Análisis de las Cuencas Hidrológicas del Arrecife Mesoamericano*. Una descripción más detallada de la aplicación del modelo de circulación ROMS, los resultados, así como también las observaciones en los patrones de circulación de SeaWiFS se encuentran en el documento "Dinámica de la material suspendida en la región del Arrecife Mesoamericano" en el mismo CD.

Figura 10. Valores Estimados de Descarga Mensual Derivados de N-SPECT

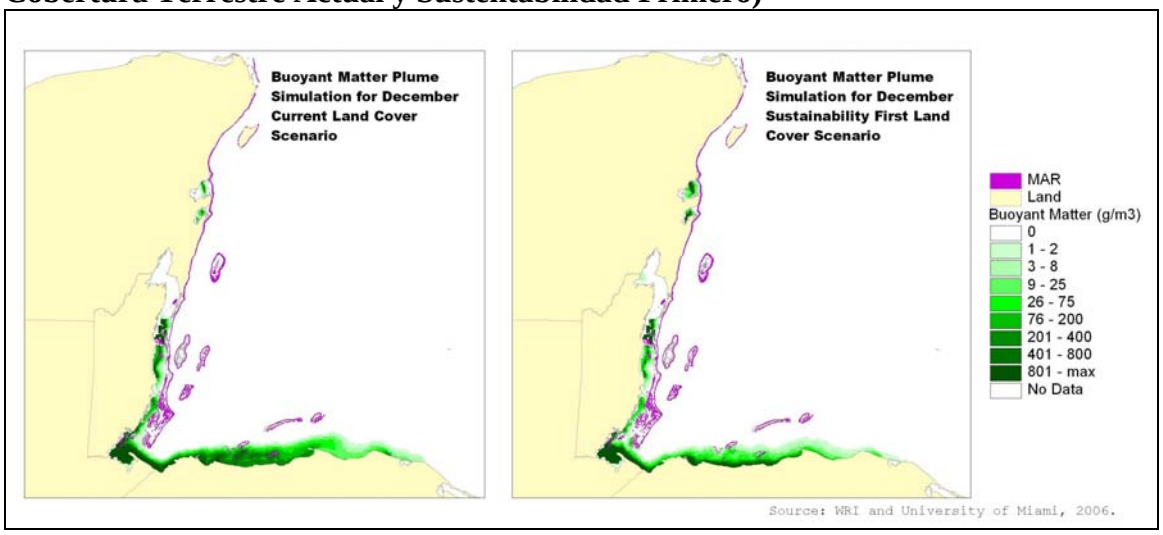


Fuente: WRI, 2006.

Los resultados del modelaje para los dos escenarios se pueden comparar para explorar el posible impacto de los cambios en el uso del suelo sobre la descarga modelada de material suspendido al Arrecife Mesoamericano. Se puede comparar la extension y concentración de la pluma en los dos escenarios mes por mes; también es posible derivar estadísticas anuales que reflejen la concentración media anual en cada localidad del arrecife, la concentración anual máxima, o el número de meses donde la concentración es mayor que algún límite (umbral) previamente determinado.

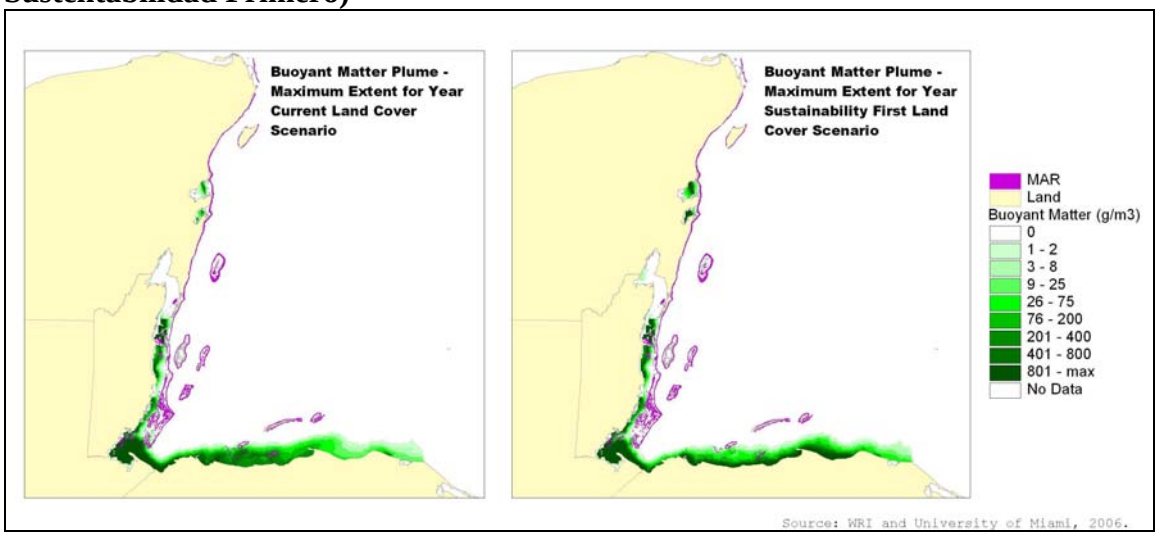
La Figura 11 refleja la pluma simulada de la materia suspendida para el mes de Diciembre en el escenario de cobertura terrestre actual y “sustentabilidad primero”. El modelo ROM predice una pluma de material suspendida menos extensa y menos concentrada para la costa de Honduras durante el mes de Diciembre; al mismo tiempo, el modelo ROMS predice un incremento en la concentración de material suspendida en dos Bahías semi-cerradas en Yucatán: La Bahía de la Ascención, y la Bahía de Espíritu Santo. Gran parte de este cambio se debe a una disminución en la descarga de sedimento en el escenario de sustentabilidad primero. Sin embargo, se observa un incremento en la materia flotante en la Península de Yucatán, el cual se explica por un cambio en el patrón de circulación a lo largo del Arrecife Mesoamericano que el modelo ROMS predice. Tal como el clima presenta variabilidad, la circulación marina también varía. Durante el invierno en el escenario de sustentabilidad primero, el giro rotario normal en contra de las manecillas del reloj al norte de Honduras, es reemplazado por la corriente Caribeña. La corriente fluye en forma directa desde el extremo oriental de Honduras hacia la costa de la península de Yucatán llevando consigo sedimentos desde Honduras.

Figura 11. Simulación de la Concentración de Materia Suspendida a lo Largo de la Región del Arrecife Mesoamericano para el Mes de Diciembre (Escenarios de Cobertura Terrestre Actual y Sustentabilidad Primero)



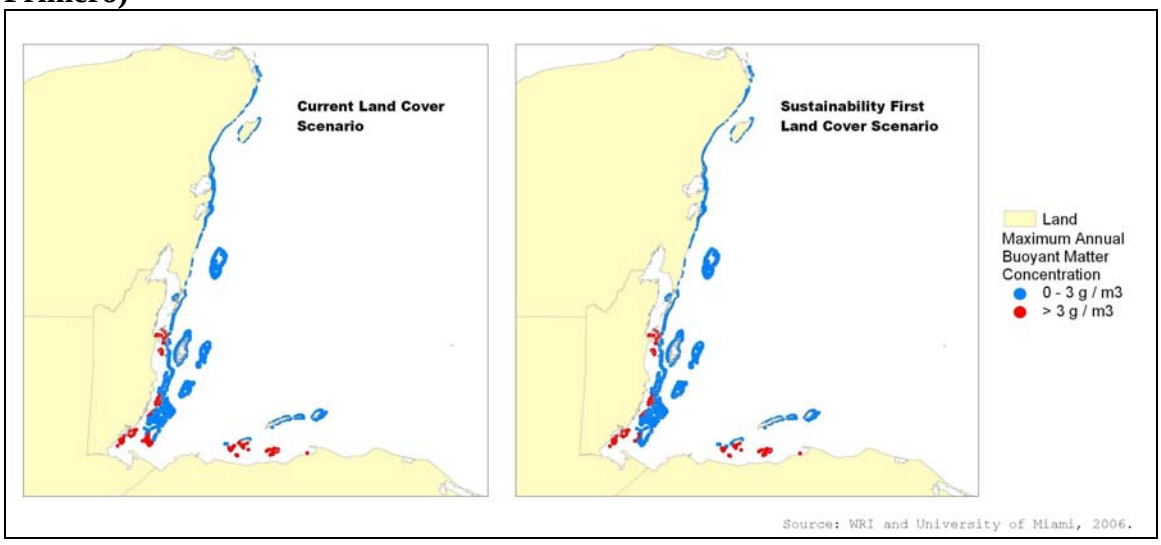
La Figura 12 refleja la extensión y concentración máxima de la pluma de materia suspendida al año para los dos escenarios de cobertura de terreno. La simulación de ROMS indica que en el escenario de sustentabilidad primero, la pluma de la extensión y concentración de materia suspendida se reduce a lo largo de la costa de Honduras, y que materia menos flotante alcanza el arrecife de barrera del sur de Belice. La simulación también predice incrementos en la concentración en bahías semi-cerradas en Yucatán. Estas reducciones en la extensión de la pluma de la material suspendida podrían resultar en cambios en la descarga de sedimento que resultan de cambios en la cobertura terrestre (reducciones en el área de terrenos cultivados), pero también podrían indicar la variabilidad en las simulación del modelo ROMS.

Figura 12. Concentración Máxima Simulada a lo Largo de la Región del Arrecife Mesoamericano Durante un Año (Escenarios de Cubierta Terrestre Actual y Sustentabilidad Primero)



La Figura 13 muestra un mapa de los arrecifes de coral de la región independientemente de que la concentración de material suspendida exceda 3 gramos por metro cúbico (g/m^3) en cualquier mes del año. Bajo la simulación ROMS para el uso del suelo actual, 12 por ciento de los arrecifes de coral de la región exceden este límite (3 g/m^3). Por otra parte, en el escenario de sustentabilidad primero, la proporción baja a 10 por ciento. Esto es un indicador del efecto significativo que puede tener un major manejo de suelo en la descarga de sedimento y contaminantes al Arrecife Mesoamericano.

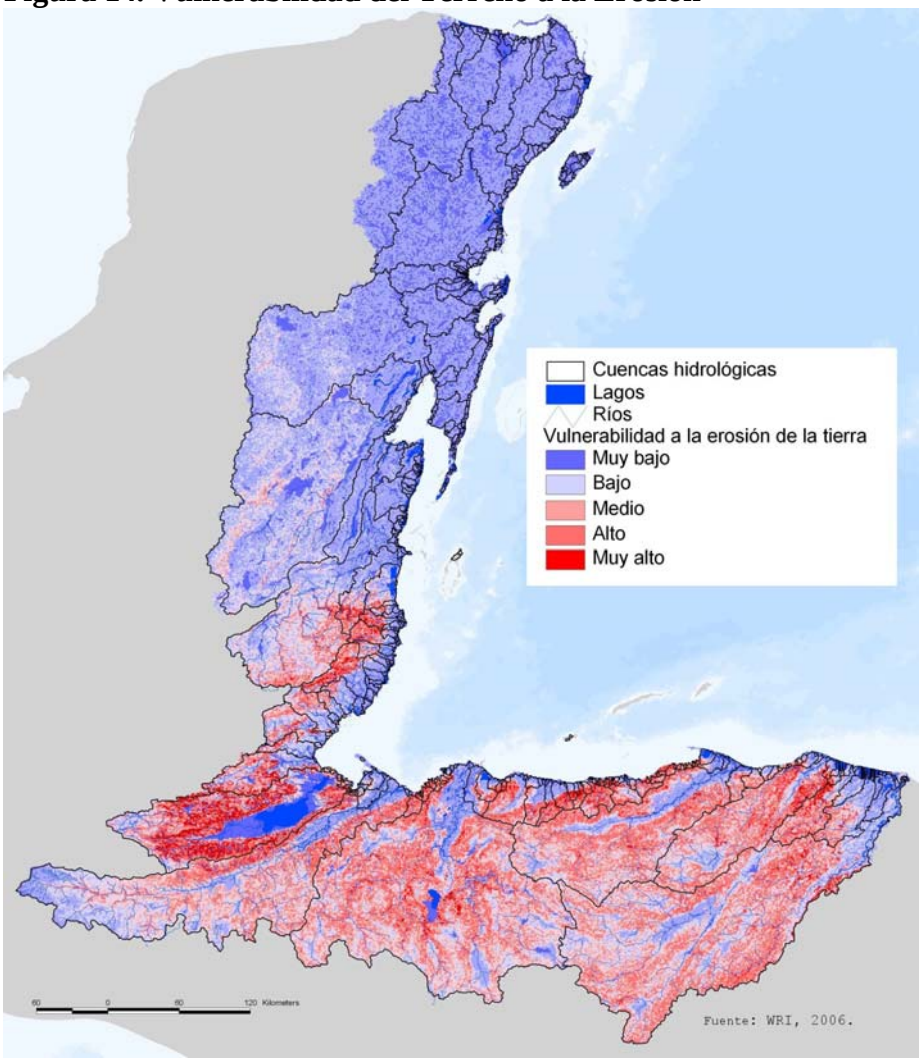
Figura 13. Mapa de la Concentración de Materia Suspendida en el Arrecife Mesoamericano (Escenarios de Cobertura Terrestre Actual y Sustentabilidad Primero)



6) Vulnerabilidad Terrestre a la Erosión

La definición de prioridades para manejo del suelo require de información a nivel local sobre las fuentes de sedimento y la vulnerabilidad a la erosión de ciertas áreas. WRI desarrolló un indicador a nivel del paisaje sobre la vulnerabilidad del terreno a la erosión. Incorporando información sobre la pendiente del terreno, erosividad del suelo, y precipitación anual, este indicador estima la vulnerabilidad relativa del terreno a la erosión a una resolución de 1-km. El indicador no incorpora información sobre cobertura de terreno o el uso actual de suelo. Sin embargo, este instrumento indica de forma general las áreas que son susceptibles a la erosión y proporciona una guía sobre dónde se podría restringir el desarrollo, o dónde se debería promover la implementación de mejores practicas de manejo agrícola. La vulnerabilidad es alta en muchas áreas en Guatemala y Honduras así como también en algunas áreas montañosas de Belice (Véase Figura 14).

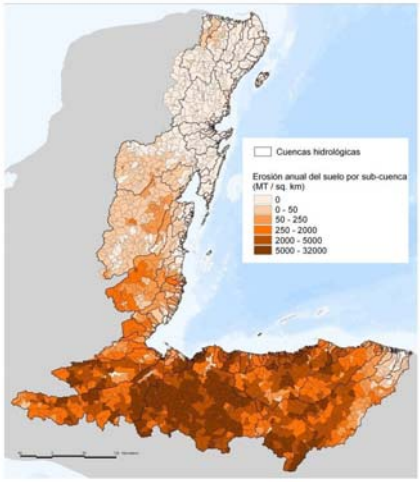
Figura 14. Vulnerabilidad del Terreno a la Erosión



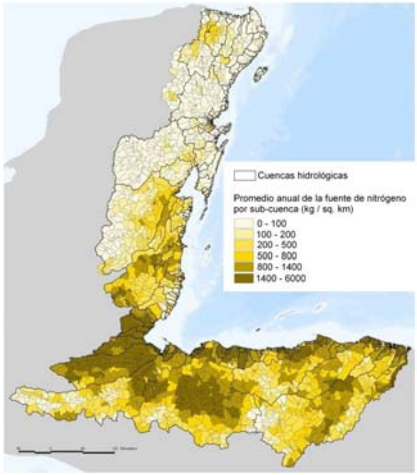
7) Fuentes Locales de Sedimento y Nutrientes

El modelo N-SPECT se corrió en el modulo de "efectos locales" para evaluar la cantidad de sedimento erosionado y nutrientes a una resolución de 250 m por celda en la retícula, e independientemente de las celdas adyacentes en la cuadrícula. La evaluación se hizo en base a la cobertura terrestre existente (2003/04). Los resultados fueron sintetizados por sub-cuencas, con el objeto de proveer información para dar prioridad y enfocar mejores prácticas de manejo. Los mapas siguientes muestran el promedio de erosión, descarga de Nitrógeno y Fósforo por celda de la retícula dentro de cada sub-cuenca. Los límites de las cuencas hidrológicas se han incluido para facilitar la referencia y relación de estas fuentes locales dentro de las sub-cuencas de los mapas anteriores de transporte de sedimentos y nutrientes por cuenca.

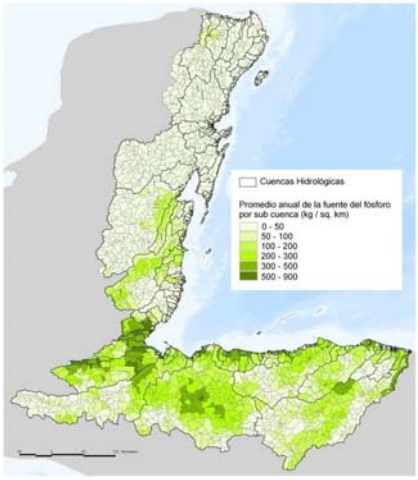
Figura 15 Contribución Promedio de Sedimento, Nitrógeno y Fósforo a Nivel de Sub-Cuencas



Promedio anual de la fuente de nitrógeno por sub cuenca



Promedio anual de la fuente de fósforo por sub cuenca



Fuentes: WRI, 2006.

La información sobre las fuentes locales de sedimento, Nitrógeno y Fósforo también se sintetizó al nivel de país. La mayoría de los sedimentos y nutrientes transportados por las cuencas hidrológicas a lo largo de la región del Arrecife Mesoamericano tienen su origen en Honduras. El modelo indica que más del 80 por ciento del sedimento proviene de Honduras, mientras que el 17 por ciento se origina en Guatemala. Un porcentaje relativamente menor proviene de Belice y México. Honduras también constituye la fuente más grande de nutrientes (55 por ciento de Nitrógeno y 60 por ciento de Fósforo) y Guatemala contribuye con casi un cuarto de todo el Fósforo y Nitrógeno en estas cuentas hidrológicas. Belice contribuye con casi 12-13 por ciento de Fósforo y Nitrógeno mientras que se estima que, de todas las cuencas hidrológicas modeladas, México contribuye con casi cinco por ciento del total de nutrientes.

Tabla 8. Porcentaje de las Fuentes de Erosión, Nitrógeno y Fósforo por País dentro de la Región del Arrecife Mesoamericano

País	Erosión (Porcentaje del total)	Nitrógeno (Porcentaje del total)	Fósforo (Porcentaje del Total)
Honduras	83%	55%	60%
Guatemala	17%	26%	25%
Belice	1%	13%	12%
México	0%	6%	4%

Fuente: WRI, 2006

Conclusión

El análisis presentado en éste documento proporciona un panorama regional de la magnitud y los patrones de descarga de sedimento y nutrientes en las aguas costeras del Arrecife Mesoamericano. Sobre la base de este análisis, se puede concluir lo siguiente:

Es necesario que las acciones políticas se enfoquen hacia la contribución de los terrenos agrícolas.
La mayoría del sedimento y nutrientes que son transportados al Arrecife Mesoamericano a través de las cuencas hidrológicas de la región provienen de terrenos agrícolas en Honduras y Guatemala. La contribución de Belice y México es sustancialmente menor aunque todavía constituye una amenaza a lo largo de la costa. Existen muchas iniciativas promisorias para reducir la contaminación en la región. Entre estas iniciativas se encuentra el manejo sustentable de los bosques y el manejo integrado de cuencas en Guatemala; un mejor programa de planificación de uso de suelo, reforestación y conservación de suelos en Honduras; así como iniciativas similares en México y Belice. Es necesario que estos importantes esfuerzos tengan el apoyo del público, reciban reconocimiento e inversiones contínuas.

Los resultados pueden usarse para identificar áreas donde se necesita un mejor manejo agrícola.
Este análisis identifica áreas vulnerables donde se necesita evitar la conversión hacia usos de suelo que causan erosión, o, donde se necesita implementar prácticas de manejo en áreas que ya han sido transformadas. El análisis también identifica áreas con erosión y descarga de nutrientes significiativos donde se deberían implementar mejores prácticas de manejo agrícola.

Se puede reducir la descarga de sedimento y nutrientes a través de políticas que favorezcan el desarrollo sustentable.
Como lo demuestran los hallazgos de éste análisis, políticas que favorecen el desarrollo sustentable tales como la planificación del uso del suelo, el manejo integrado de cuencas hidrológicas, y otras, pueden ayudar a disminuir la erosión y descarga de contaminantes reduciendo el sedimento y los nutrientes que alcanzan el Arrecife Mesoamericano.

Es necesario conducir un modelaje más detallado para crear información más exacta y con mayor resolución.
Los análisis regionales son útiles y proporcionan un panorama para priorizar áreas donde se necesita actuar inmediatamente; sin embargo, los análisis locales proporcionan la información detallada y exacta que políticos necesitan para encauzar mejor sus intervenciones. Las herramientas que se proporcionan en el CD *Análisis de las Cuencas Hidrológicas del Arrecife Mesoamericano* (Proyecto WRI/ICRAN, 2006) permiten a los usuarios hacer análisis de descarga de sedimento y nutrientes en áreas más pequeñas dentro del Arrecife Mesoamericano, por ejemplo, al nivel de cuenca hidrológica.

En especial, el modelo N-SPECT puede ser aplicado a cuencas hidrológicas individuales, o grupos de cuencas usando la información de elevación a 90 m que se proporciona en el manual de usuario del modelo. Un modelaje más detallado a nivel local incrementará la exactitud de los resultados si se usa información sobre pendiente y cobertura terrestre a una resolución más alta, y si el modelo se calibra de acuerdo a los tipos de suelo y a los regimenes de precipitación local.

Sería de gran valor poder extender el presente análisis para incluir el efecto de mejores prácticas de manejo agrícola sobre la erosión y escorrentía de contaminantes. Esta extensión requeriría información detallada sobre cómo cada una de las mejores prácticas de manejo influye sobre las tasas de erosión y los coeficientes de escorrentía de contaminantes. Una vez esta información esté disponible, debería ser posible utilizar N-SPECT para evaluar reducciones en las descargas al tratar cada intervención de manejo en cada tipo de cobertura del suelo, como una categoría única con características específicas de erosión y escorrentía de contaminantes. Por ejemplo, el cultivo de banano con control mejorado de la erosión, sería tratado como una categoría independiente.

Se necesita mejorar el modelo para incrementar la exactitud de los valores estimados de las descargas de nutrientes y sedimento.
Se recomienda que se invierta para mejorar la programación del modelo N-SPECT de manera que se pueda incluír la redisposición y pérdida de nutrientes durante su transporte

en las cuencas hidrológicas. Esta mejora resultaría en una herramienta con mejor capacidad de estimar las descargas actuales de sedimento y nutrientes en desembocadura de los ríos. La exactitud de estas estimaciones podría entonces ser evaluada con mediciones de campo.

Este tipo de análisis puede ayudar a evaluar el progreso alcanzado en la reducción de la amenaza que representa el sedimento.
Existen varias iniciativas nacionales, así como iniciativas regionales financiada por varios donantes que buscan reducir ó mitigar las amenazas al Arrecife Mesoamericano. Este análisis puede ayudar a dichas iniciativas a estimar el progreso porque provee la información necesaria para asegurarse que se están moviendo en la dirección correcta.

Este análisis puede apoyar fuertemente el manejo transnacional de recursos naturales.
Se necesita una cooperación constructiva y regional entre varias partes interesadas, para mitigar y reducir las amenazas terrestres al Arrecife Mesoamericano. Por ejemplo, acuerdos multilaterales de cooperación entre los cuatro países, acuerdos entre los sectores agrícolas y de turismo y grupos de la sociedad civil. Esta herramienta trabaja sin importar las fronteras y los sectores, y crea información que permite establecer un diálogo productivo sobre el orígen de las amenazas y medidas para mitigarlas.

La colaboración con La Red de Acción Internacional para los Arrecifes de Coral (ICRAN) continuará apoyando la aplicación de las herramientas y los resultados de éste análisis en la región. Para más información sobre ICRAN, por favor visite: www.icranmar.org.

Por favor dirija sus preguntas o comentarios sobre este análisis a:

Lauretta Burke (lauretta@wri.org) and Zachary Sugg (zsugg@wri.org)

World Resources Institute,

10 G St. NE,

Washington, DC 20002,

+1 (202) 729-7600

Sitio de Internet: reefsatrisk.wri.org

Notas Técnicas Adicionales

1) **Delineación de las Cuencas Hidrológicas** – Las cuencas hidrológicas fueron delineadas a una resolución de 250 m en WRI usando N-SPECT y ArcMap. Fue necesario hacer la delineación en N-SPECT para hacer compatibles los resultados con el DEM. Esta compatibilidad permite detectar la localidad de los ríos (donde se acumulan las descargas) y los límites de las cuencas hidrológicas. Sin embargo, el modelo N-SPECT agrupa las cuencas hidrológicas costeras, lo que hace difícil examinar las descargas específicas en los ríos y el transporte de sedimento. Para resolver esto, se extrajo información sobre la dirección de la descarga del modelo N-SPECT; esta información se convirtió en la base para derivar información más detallada sobre las cuencas hidrológicas en ArcMap (utilizando el comando BASINS en ArcTools\Spatial Analyst). En ArcMap se hizo un análisis de Acumulación de Descargas para identificar los ríos y arroyos afectados. La información sobre acumulación de descargas fue combinada con las cuencas hidrológicas para identificar los puntos donde las descargas son más intensas en cada cuenca. Este punto fue designado "punto de descarga", o desembocadura del río.
2) **Largo de la Pendiente en N-SPECT.** Se hicieron dos delineaciones de cuencas hidrológicas en el modelo N-SPECT. La primera delineación se basó usando información hidrológica corregida del DEM (la corrección del DEM incluye pendientes artificiales a lo largo de los ríos ("*burned*") y el resultado fue una buena delineación de cuencas hidrológicas. La segunda delineación se hizo usando información "cruda" del DEM. Aunque el segundo proceso resultó en una delineación de cuencas hidrológicas menos exacta, fue posible obtener cálculos más correctos sobre pendientes y la longitud de las mismas (llamadas Lsgrid en N-SPECT). La información más detallada sobre pendientes y su longitud se copió en la capa de GIS con la delineación correcta de las cuencas hidrológicas del primer proceso. Todos los análisis subsiguientes se hicieron usando la información combinada.
3) **Factor R –** La ecuación utilizada para calcular el Factor-R fue la siguiente:

   R=3786.6 + 1.5679 * (Precipitación en mm) – 1.9809 * (Elevación en m)

   Donde:

   R esta representada en unidades métricas (MJ * mm * ha-1 * h-1 * y-1) ó (megajoules * mm por hectárea por año). Sin embargo, el modelo N-SPECT require unidades en el sistema inglés (cientos de pies * toneladas de fuerza * pulgadas * acres-1 * hora-1 * año-1). Las unidades del sistema métrico decimal fueron convertidas al sistema métrico inglés dividiéndolas entre 17.02.
   Referencia: USDA-ARS Manual de Agricultura No. 703.